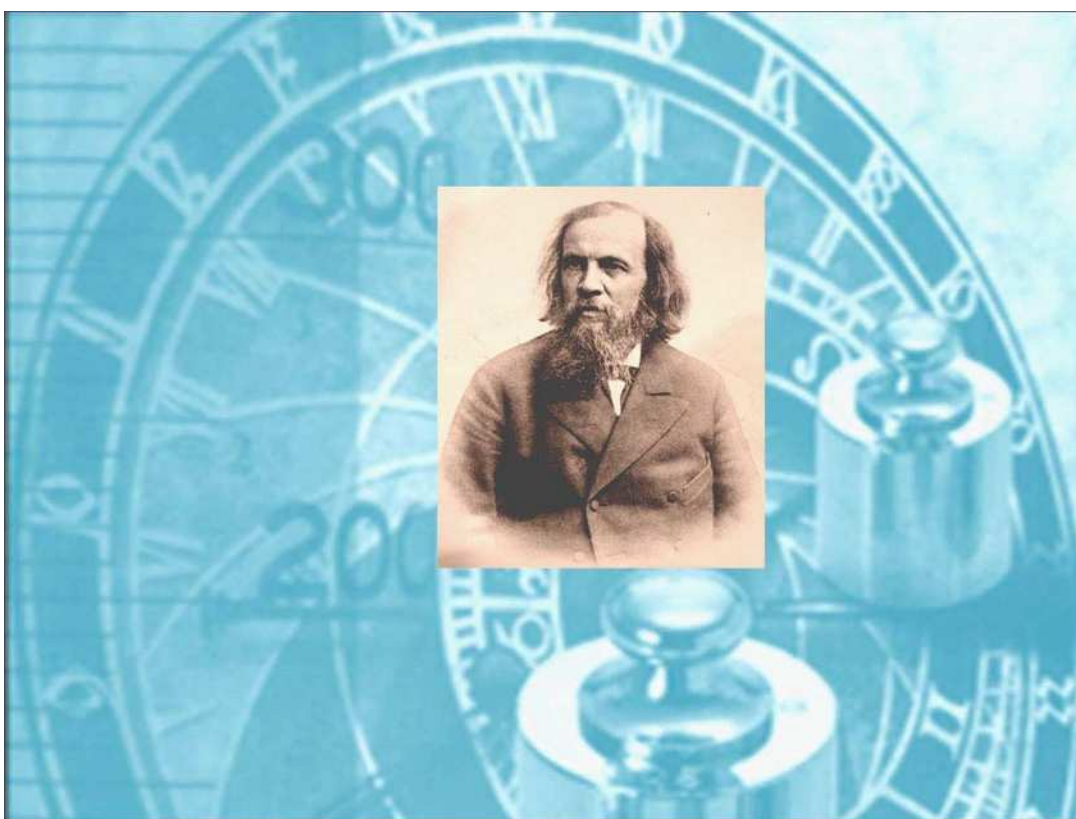


Д.Г. Грязин

**ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ**



**Санкт-Петербург
2019**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Д.Г. Грязин

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Учебник

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 12.03.01 "Приборостроение"; 15.03.04
"Автоматизация технологических процессов и производств"; 15.03.06
"Мехатроника и робототехника" в качестве учебника для реализации
образовательных программ высшего образования



Санкт-Петербург
2019

Грязин Д.Г. Основы метрологии и метрологического обеспечения.— СПб: Университет ИТМО, 2019. – 72 с.

Рецензент:

Марусина Мария Яковлевна, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория " ординарный профессор") факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по программам нескольких направлений подготовки, в которых читаются дисциплины связанные с метрологией или метрологическим обеспечением.

В учебнике изложены основополагающие разделы метрологии, которые дополнены информацией об особенностях современного состояния метрологической науки. Разделы учебника посвящены этапам исторического развития метрологии, тесно связанным со становлением в мире системы единиц физических величин, которая была обобщена и выразилась в принятии в мировую практику системы единиц СИ. В учебнике рассматриваются вопросы передачи размеров физических величин и эталонирования, общие вопросы теории погрешностей измерений. Предложена их классификация и методы расчета. Особое внимание уделяется рассмотрению терминологии в области метрологии и измерительной техники, базирующейся на понятиях, приведенных в РМГ 29. С позиции практического использования рассматривается все многообразие метрологических измерительных процедур. Приводятся материалы по созданию и аттестации методик измерений, что является актуальным в связи с современным направлением развития метрологии. Затронуты актуальные вопросы реализации метрологического надзора и межлабораторных сличений, а также государственного регулирования работ по метрологическому обеспечению. Материалы дополнены контрольными вопросами для лучшего усвоения материала.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019
© Грязин Д.Г., 2019

Содержание

	Стр.
Введение	5
1. Этапы исторического развития и становления метрологии.....	6
2. Единицы физических величин.....	12
2.1 Унификация единиц физических величин. Историческая справка.....	12
2.2 Международная система единиц СИ.....	15
2.2.1 Историческая справка.....	15
2.2.2 Определения основных единиц системы СИ	19
2.2.3 Производные единицы СИ	20
2.2.4 Кратные и дольные единицы СИ.....	21
3. Терминология в измерительной технике.....	25
3.1 Термины и определения в области метрологии	25
3.2 Классификация измерений	28
4. Общие вопросы теории погрешностей	30
4.1 Виды погрешностей и особенности терминологии в соответствие с РМГ 29.....	30
4.2 Термины, позволяющие нормировать погрешности средств измерений	34
4.3 Методы нормирования погрешностей средств измерений. Класс точности приборов	36
4.4 Расчет оценки инструментальной статической погрешности результата измерения по паспортным данным используемого средства измерений	43
4.4.1 Вычисление погрешности при различном нормировании класса точности	43
4.4.2 Правила округления значений погрешности и результата измерения	44

5. Метрологические измерительные процедуры	46
5.1 Процедуры передачи размера физической величины. Эталоны, поверочные схемы	46
5.2 Поверка и калибровка средств измерений	49
5.3 Процедуры измерительного эксперимента	50
5.3.1 Особенности измерительного эксперимента	50
5.3.2 Постановка измерительной задачи	52
5.3.3 Подготовка и планирование измерения	52
5.3.4 Измерительный эксперимент	54
5.3.5 Обработка данных при измерении	54
5.3.6 Запись результата измерения и показателей погрешности в соответствии с установленной формой представления	55
6. Методики измерений	57
6.1 Назначение и общие требования	57
6.2 Процедура разработки и состав методик (выполнения) измерений	59
6.3 Аттестация методик (выполнения) измерений	60
6.4 Стандартизация методик. Метрологический надзор за методиками	61
7. Государственное регулирование работ по метрологическому обеспечению	63
7.1 Закон о метрологии и его реализация	63
7.2 Метрологическая экспертиза	64
7.3 Аттестация методик (методов) измерений	65
7.4 Межлабораторные сличения	66
Заключение	68
Список литературы	69

Введение

Развитие промышленного производства, науки, торговли да и иных сфер нашей жизни невозможно без достижений метрологической науки. Великий учёный-судостроитель, академик А.Н. Крылов в статье о Д.И. Менделееве, ссылаясь на его высказывания, писал [1 стр. 378]: «Задача метрологии – довести до высшей степени точности и совершенства необходимые методы измерений и измерить неизменные физические постоянные, входящие в новые явления». История развития технического прогресса непосредственно связана с борьбой за точность. Метрологическое обеспечение является основой измерительной деятельности, позволяющей увеличивать точность измерений до значений, востребованных в практической работе.

В учебнике изложены основополагающие разделы метрологии, которые дополнены современными взглядами и достижениями метрологической науки. Историческая справка позволяет обозреть этапы становления в мире системы единиц физических величин и особенности её введения в России. Широко представлены вопросы передачи размеров физических величин и эталонирования, общие вопросы теории погрешностей измерений. Углублённо изучается терминология в области метрологии и измерительной техники, базирующейся на понятиях, приведенных в РМГ 29. С позиции практического использования рассматривается все многообразие метрологических измерительных процедур. Приводятся материалы по созданию и аттестации методик измерений, что является актуальным в связи с современным направлением развития метрологии. Затронуты актуальные вопросы реализации метрологического надзора и межлабораторных сличений, а также государственного регулирования работ по метрологическому обеспечению. Материалы дополнены контрольными вопросами для лучшего усвоения материала.

Издание предназначено для обеспечения усвоения студентами учебного материала по дисциплинам:

- Метрологическое обеспечение приборостроительного производства.
- Метрология, стандартизация и сертификация.
- Метрологическое обеспечение цифрового производства,

входящим в направления подготовки:

- 12.03.01 «Приборостроение»;
- 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов»;
- 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Учебник может быть использован при самостоятельной работе студентов над теоретическим лекционным материалом, а также во время практических занятий и на консультациях. Приведённые вопросы для самопроверки направлены на общий контроль знаний студентов.

Автор выражает большую благодарность д.т.н. Татьяне Николаевне Сирой за предоставленные материалы, которые украсили учебник, и полезные консультации, позволившие улучшить его содержание.

*Не делай неправды в суде, в мере,
в весе и в измерении*

Книга Ветхого завета

1. ЭТАПЫ ИСТОРИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И СТАНОВЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИИ

Само слово «метрология» произошло от сочетания двух греческих слов «метрон» (мера) и «логос» (учение). В современных терминологических документах метрология определена как «наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности» [2, 3]. В этом определении указаны основные составляющие науки: учение об измерительной процедуре, об обеспечении единства измерений, о необходимых качествах измерений (точности их результатов).

Все эти составляющие метрологии в историческом плане сформировались только в конце XIX века, но начало метрологических знаний относится к далекому прошлому и связано с установлением единиц физических величин и их материального воплощения.

В эволюции метрологических знаний могут быть выделены несколько этапов, характеризующихся определенным уровнем представлений об измерениях и состоянием их метрологического обеспечения. На начальном этапе для измерений использовали естественные предметы и явления. Единицами времени служили сутки и их доли, меры длины носили антропологический характер: длина пальцев руки, локтевой сустав человека и т.п. Так, в Киевской Руси мерами (единицами) служили: *вершок* (верх перста) – длина фаланги указательного пальца; *пядь* (от «пятерни») – расстояние между концами вытянутых большого и указательного пальцев; *локоть* – расстояние от локтя до конца среднего пальца; *сажень* (от «сягать», достигать) – предел того, что может достать человек [4].

Большие расстояния оценивали количеством *переходов* – длиной пути, проходимого человеком за день. В древнем Риме исходными мерами длины служили стопа (фут), локоть; в земледелии применялся *акт* – длина борозды, которую пара быков пропахивает без понукания [5].

Вместе с тем, уже в древности стали использовать и вещественные меры. Так, в Древнем Вавилоне во II веке до нашей эры применялась мера времени

мина, составляющая промежуток, за который вытекала вода из принятых там водяных часов (примерно два астрономических часа). Впоследствии мина стала меньше и превратилась в нашу минуту. В качестве мер веса использовались естественные предметы: до нашего времени дошли *карат* (в переводе – «семя боба, горошина»), единица аптекарского веса *гран* (в переводе с латинского «зерно»). Так, в книге [4] отмечается: «У древних народов эталоны линейных мер и веса хранились очень заботливо в храмах и освящались религией... Египтяне имели в коллегии своих жрецов должностное лицо, в обязанности которого входило знание всех мер и хранение их первичных образцов... Византийский император Юстиниан приказал, чтобы все линейные меры и меры веса хранились в христианских храмах». В Киевской Руси надзор за мерами был закреплен в церковном уставе князя Владимира (X век): «... епископам блюсти торговые весы, меры и чаши от весов без пакости» [4].

Все эти меры, в том числе имевшие одинаковые названия, были разными по своим значениям в разных странах и даже отдельных областях одного государства. Исследователи подчеркивают, что зачастую в пределах одной страны затруднительно установить точное значение меры, изменявшееся в разных странах и в разное время. Например, английский локоть в XIV веке равнялся 1,37 м в Шропшире, 1,22 м в Джерси, 0,95 м в Шотландии, в Австрии локоть в XIX веке приближался к 80 см, а во Франкфурте существовал локоть всего 54,7 см [4].

Аршин в Московском государстве в XIV веке равнялся 70,9 см, позже 72 см и, наконец, 71,1 см; сажень в XIII веке составляла 152 см, затем 180 см, в XV в. 216 см, а в XIX – 213,36 см.

Многообразие единиц и их значений становилось серьезной помехой в хозяйственной жизни, в торговле, поэтому в большинстве европейских государств усилилась борьба за их унификацию. Выходили указы, постановления об использовании единых мер с заданным значением. Так, в Московском государстве при Иване Грозном появилась Двинская грамота (1550 г.), в которой устанавливалась единая мера сыпучих тел – осьмина, порядок ее хранения и передачи размера «в тех местах, где торги».

Хранение образцовых мер по-прежнему поручалось духовенству и монастырям как наиболее надежным учреждениям. Однако уже чаще эти функции переходили в государственные руки – магистраты городов, таможенные службы, приказы [8]. В упомянутой Двинской грамоте предписывалось местным выборным людям («старостам, сотским, целовальникам и лучшим земским людям») изготовить деревянные осьмины по медным, которые рассылались их приказов Московского государства. Именно в приказах стали хранить образцовые меры; метрологические функции постепенно брали на себя государственные учреждения, явившиеся зачатками метрологической службы [7].

С дальнейшим ростом торговли и развитием техники в XVII – XVIII вв. возрастала потребность в более точном определении мер и сопоставлении их значений. Выявилась и сложность решения этих задач. Измерительными приборами стали заниматься ученые разных стран. И. Ньютон (1642–1727) изучал древнеегипетские меры длины. Х. Гюйгенс (1629–1695) предложил в качестве естественной меры длину маятника часов с определенным периодом колебаний, кроме того, ученый занимался определением реперных точек термометра. Лаплас (1749–1827) входил в комиссию Парижской академии наук по разработке метрической системы мер. В России много внимания единицам уделял М.В. Ломоносов (1711–1765), который впервые в стране в свои работы ввел меру и вес. В 1736 г. по решению Сената была образована комиссия мер и весов, в состав которой входил и великий математик Л. Эйлер (1707–1783).

Осознание значимости проблем измерений привело к формированию новой научной дисциплины – метрологии, получившей впервые свое название в труде А. Поктона (*«Metrologies, ou trait de mesures, poids et monnaies»*, Париж, 1780). В России первым печатным изданием в этой области стала монография Ф.И. Петрушевского *«Общая метрология»* (1849), удостоенная Императорской академией наук Демидовской премии. В этой книге метрология была определена как «описание всякого рода мер по их наименованиям, подразделениям и взаимным отношениям». Все величины сводились к мерам длины, площади, объема, веса и денежным единицам (меры ценности).

Эти труды можно считать завершением второго этапа развития метрологических знаний – этапа чисто прикладного, описательного характера. Уже в то время большое значение приобрело изучение истории становления различных единиц, что в дальнейшем привело к появлению отдельного направления в науке – исторической метрологии.

Следующий этап – от разработки метрической системы мер до создания централизованных метрологических учреждений в передовых промышленных странах – продолжался почти весь XIX век.

С развитием торговли и промышленности различия в единицах, применяемых для практических измерений, стали создавать большие неудобства, что привело к идее создания единой для всех системы мер. Такая система под девизом «На все времена, для всех народов» была разработана в конце XVIII в. французскими учеными. 8 мая 1790 г. Национальное собрание Франции приняло декрет о реформе системы мер и поручило Парижской Академии наук выполнить необходимые подготовительные работы. Так было положено начало разработке метрической системы мер.

В 1795 г. в ходе Французской революции на основании декрета Учредительного собрания Франции конвент принял закон о введении метрической системы мер в стране и поручил комиссии, в которую входили виднейшие ученые того времени (Кулон, Лагранж, Лавуазье, Лаплас), выполнить

работы по определению единиц длины и массы. Работа комиссии завершилась только в 1840 г., когда платиновые прототипы (эталоны) метра и килограмма были переданы на хранение архиву Франции. Это событие начинает новый этап становления науки: еще стихийно, но уже целенаправленно закладываются основы метрологии – теоретические, прикладные, законодательные.

Развитие промышленных технологий и науки сопровождалось растущим интересом к изучению разнообразных свойств полей излучения объектов: электрических, магнитных, тепловых. Создавались новые измерительные устройства, требовавшие метрологического обеспечения, вводились соответствующие новые величины. Проблемами измерений занимались ведущие ученые того времени: лорд Кельвин, Г. Гельмгольц, в России – академики Б. Якоби, А. Купфер и др. Предпринимались попытки измерений и нефизических величин, таких как экономические показатели (измерения стоимости), психические свойства, что показывало рост авторитета измерений.

Начало теоретическим изысканиям было положено естествоиспытателем Г. Гельмгольцем, автором обширной работы [6], в которой изложены математические основы теории измерений аддитивных величин. Астроном Б. Струве в 1887 г. опубликовал работу по измерениям параметров звезд. В ней ученый затронул и вопросы теории погрешностей, в частности, указал на постоянные (систематические) и переменные (случайные) причины возникновения погрешностей, разделил постоянные погрешности на инструментальные и личные, предложил пути их уменьшения.

Постоянно растущие требования к точности измерений и сопоставимости их результатов стимулировали организационно-практическую деятельность, направленную на обеспечение единства измерений в каждой стране и в международном сотрудничестве. Уже в 1842 г. в Петербурге открылось первое центральное метрологическое учреждение – Депо образцовых мер и весов (директор – академик А.Я. Купфер). Эти события завершили этап стихийной метрологической деятельности. На следующем этапе, охватившем конец XIX в. и первую половину XX в., велась целенаправленная работа по организации метрологической службы, издался ряд метрологических законодательных актов.

20 мая 1875 г. в Париже на специально созванной дипломатической конференции состоялось подписание Метрической конвенции, целью которой было обеспечение единства измерений длины и массы и дальнейшее совершенствование метрической системы мер. Конвенцию подписали полномочные представители правительств 17 государств: Германии, Австро-Венгрии, Бельгии, Аргентины, Дании, США, Испании, Франции, Италии, Перу, Португалии, России, Швеции, Норвегии, Швейцарии, Турции и Венесуэлы. От России Конвенцию подписал советник Посольства России в Париже Григорий Окунев, кавалер орденов России Святой Анны 1-й степени, Святого Станислава 1-й степени, Святого Владимира 3-й степени, Командор Ордена Почетного

легиона Франции и т.д. В состав российской делегации входил академик Г.И. Вильд, который затем в течение 20 лет представлял нашу страну в Международном комитете мер и весов. К настоящему времени Конвенцию подписали 48 стран, в которых сосредоточено 95% мирового промышленного капитала. В соответствии с Метрической конвенцией в 1875 г. впервые была создана Международная организация по мерам и весам и действующее под ее эгидой научное учреждение – Международное бюро мер и весов (ММВБ), для которого в предместье Парижа, в Севре, правительство Франции предоставило павильон Бретейль. ММВБ было первым международным научно-исследовательским учреждением, существующим при поддержке стран, подписавших Конвенцию, и ведущим исследования по совместно вырабатываемым программам в области метрологии. Высшим международным органом по вопросам установления единиц, их определений и методов воспроизведения была определена Генеральная конференция по мерам и весам, которая избирает Международный комитет мер и весов, руководящий работой всей организации в промежутках между Генеральными конференциями.

Реформой и развитием метрологической системы в России мы обязаны Д.И. Менделееву. В России исторически сложилось так, что вопросами метрологии ведало Министерство финансов (с 1832 – Департамент горных и соляных дел, а с 1869 – Департамент торговли и мануфактур). В 1892 г. Депо образцовых мер и весов находилось в ведении Министерства финансов по Департаменту торговли и мануфактур. Приглашение возглавить метрологическое учреждение России Д.И. Менделеев получил в 1892 г. от Министра финансов И.А. Вышнеградского (руководил министерством с 1887 по 1892 гг.), известного ученого, а также удачливого предпринимателя, но основная деятельность на посту Управляющего Главной палатой мер и весов прошла под руководством Сергея Юльевича Витте (Министр финансов с 1892 по 1903) и Владимира Ивановича Ковалевского (директор Департамента торговли и мануфактур с 1892 по 1903). Поддержка С.Ю. Витте и В.И. Ковалевского, их понимание значения метрологии в жизни общества, умение правильно подготовить и преподнести документы в Государственный Совет во многом обеспечили успешное проведение реформы Д.И. Менделеева в жизнь. Одним из немаловажных факторов при проведении любых реформ является формирование общественного мнения. Д.И. Менделеев считал, что преобразования в области метрологии, проводимые в России, подлежат «суду не только начальства, но и всей публики, а также и компетентнейших ученых других стран». Реформа началась с преобразования Депо в Главную палату мер и весов – первый научно-метрологический и поверочный центр страны, с создания первоклассно оборудованной лабораторной базы. Значение нового учреждения в жизни общества и его основную задачу – обеспечение в государстве «единообразия, верности и взаимного соответствия мер и весов» – определило Положение о

Главной палате от 8 июня 1893 г. Д.И. Менделеев сформулировал обширную программу работ в области фундаментальной физики, предусматривающую определение ускорения (напряжения) силы тяжести, влияния формы и компактности тел на их вес, проверку закона сохранения материи и др. Необходимость создания новых эталонов была вызвана потребностями науки и промышленности в более точных и единообразных измерениях не только длины и массы, но и многих других физических величин: температуры, давления, времени, силы света, физико-химических, электрических (силы тока, мощности, сопротивления и т.д.). Новые эталоны позволили впервые в метрологической практике приступить в Главной палате к испытаниям и поверке широкого спектра контрольно-измерительных приборов: термометров, электро-, водо-, газосчетчиков, манометров, динамометров, калибров, пурок (хлебных весов) и др. Важным этапом реформы явилась организация производства образцовых и рабочих средств измерений как в мастерских Главной палаты, так и на фабриках и заводах страны. Их деятельность курировал сам Д.И. Менделеев через Министерство финансов.

Часть оборудования и средств измерений для Главной палаты ученый заказывал в лучших иностранных фирмах: «L. Oertling» (Л. Эртлинг, Лондон, 1891), «Clemens Riefl er» (К. Рифлер, Мюнхен), «Carl Bamberg» (1892), со многими из них он поддерживал творческие контакты долгие годы. Некоторые заказы Главной палаты выполняли российские фабрики и заводы: Монетный двор (золотые разновесы и шар для опытов по определению ускорения силы тяжести, клейма), Кыштымские горные заводы (чугунные шары для опытов), Балтийский завод П. Рааше (образцовые гири и весы); механический завод Ф.Х. Сан-Галли (разнообразные весы, меры объема), оптико-механическая фабрика К. Воткей (пурки, оптические приборы). Образцовые меры также изготавливались в частных мастерских (И.В. Дурзецкого, И.К. Манцевича, И.П. Горячева, Н.Н. Баландина, В. Бейльштейна), уровень работ которых соответствовал требованиям Главной палаты, и в мастерских при различных научных учреждениях: Санкт-Петербургском университете (механик Г. Францен), Николаевской Пулковской обсерватории (механик Г. Брауер выполнял заказы для более ранних работ Д.И. Менделеева, в частности, «Об упругости газов»). Разработанные при участии Д.И. Менделеева важнейшие законоположения – Положение о Главной палате мер и весов 1893 г. и Положение о мерах и весах 1899 г., а также первые научно-технические документы в области метрологии: инструкции, методики, правила, нормативы, тарифы на проведение поверок и испытаний – послужили базой для совершенствования законодательной подсистемы ГСИ. Многие аспекты метрологической деятельности были впервые утверждены законодательно. Главная палата мер и весов – центральное научноисследовательское учреждение страны – стала третьим в мире научным метрологическим центром после

Международного бюро мер и весов (Париж, Севр, 1875) и Физико-технического института (Германия, 1887), что имело огромное значение для развития науки как в Санкт-Петербурге, так и в России. Аналогичные учреждения позже появились и за рубежом, например, в Англии в 1900 г. – метрологическое отделение Национальной физической лаборатории, в США в 1901 г. Национальное бюро эталонов. Научные исследования соответствовали мировому уровню и потребностям развивающейся российской промышленности. Д.И. Менделеев провел комплекс работ по подготовке перехода России на Международную метрическую систему единиц.

Важнейшим этапом в развитии метрологии и стандартизации в России стало принятие декрета «О введении Международной метрической системы мер и весов», который был утвержден Советом народных комиссаров 14 сентября 1918 г. За основание всех измерений, производимых в стране, принимается Международная метрическая система мер и весов с десятичными подразделениями и производными. Основной единицей длины становится метр (копия международного метра, носящая знак № 28), основной единицей массы – килограмм (копия международного килограмма, носящая знак № 12), изготовленные из иридий-платины и переданные России на первой Международной конференции по мерам и весам в 1889 г. Все учреждения и общественные организации были обязаны приступить к введению метрической системы мер с 1 января 1919 г.

«На все времена и для всех народов»

Лозунг Метрической конвенции, подписанной 20 мая 1875 года в Париже

2. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1 Унификация единиц физических величин. Историческая справка

Измерения физической величины возможны лишь в том случае, когда выбрана единица соответствующей величины. Перед выполнением измерений необходимо согласовать выбор единиц, иначе результаты измерений оказываются несопоставимы, а следовательно, не имеют практической ценности. Поэтому единицы величин устанавливаются по определенным правилам и закрепляются законодательным путем. Таким образом, роль единиц величин в измерениях очень велика.

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

Единицы физических величин можно было бы в принципе выбирать произвольно, без какой-либо связи друг с другом. Именно это и наблюдалось на ранних этапах развития измерений. В каждой стране, а иногда и в каждом городе

создавались свои единицы для наиболее важных и распространенных величин (длины, площади, массы и др.). Кроме того, существовали разнообразные единицы, применяемые в различных отраслях человеческой деятельности. При этом перевод одних единиц в другие был довольно сложным (соотношения между единицами были весьма разнообразны), и это приводило к снижению точности результатов измерений.

В качестве примера можно привести некоторые единицы длины, площади, объема и массы, применявшиеся в России в 19 веке, и соотношения между ними:

- 1 аршин = 16 вершкам = 0,7112 м;
- 1 сажень = 3 аршинам = 2,1335 м;
- 1 верста = 500 саженям = 1,0668 м;
- 1 десятина = 2400 кв. саженям = $10925 \text{ м}^2 = 1,0925 \text{ га}$;
- 1 четверть = 8 четверикам = 109,9 л;
- 1 пуд = 40 фунтам = 16,38 кг;
- 1 фунт = 96 золотникам = 109,5 г;
- 1 золотник = 96 долям = 4,266 г.

Более того, единицы с одним и тем же наименованием могли в различных местностях иметь различные размеры. Например, в конце 18 века в Европе существовало до сотни футов различного размера, около полусотни различных миль, свыше 120 различных фунтов.

Разумеется, такое разнообразие единиц затрудняло сравнение результатов измерений, выполненных различными наблюдателями, и, следовательно, являлось препятствием для развития производства, торговли и науки. Поэтому возникла потребность в унификации единиц как внутри отдельных государств, так и в международных масштабах.

Начало унификации единиц связано с созданием метрической системы мер в конце 18 века. В 1790 г. во Франции было предложено создать систему новых мер, “основанных на неизменном прототипе, взятом из природы, с тем, чтобы ее могли принять все нации”.

Было предложено принять за основу системы единицу длины – метр, равный длине десятиmillionной части четверти Парижского меридиана Земли. Для определения размера метра в 1792–99 гг. были проведены измерения дуги этого меридиана. На основе этой единицы были определены и единицы других величин, например, площади (квадратный метр), объема (кубический метр) и др. За единицу массы была принята масса 1 дм^3 чистой воды при температуре наибольшей ее плотности ($+4^0\text{C}$); эта единица была названа килограммом.

При введении метрической системы были не только установлены основные единицы, но и принята десятичная система образования кратных и дольных единиц, соответствующая десятичной системе счисления. Десятичность метрической системы является одним из важнейших ее преимуществ.

Однако после проведения последующих, более точных измерений дуги парижского меридиана появилась необходимость скорректировать принятый первоначально размер метра. Более того, и этот размер нельзя было считать окончательным, так как дальнейшие измерения могли дать другое значение. Поэтому было решено перейти от единиц длины и массы, основанных на естественных эталонах, к основанным на условных материальных эталонах – прототипах.

В 1832 г. Гаусс сформулировал общие правила построения системы единиц величин, которые сводятся к следующему:

- 1) выбирают основные физические величины;
- 2) устанавливают единицы основных величин (произвольно, из соображений удобства применения);
- 3) устанавливают единицы производных величин на основе определяющих их уравнений.

Например, если величина Q есть произведение величин A и B :

$$Q = A B ,$$

то единица величины Q определяется как произведение единиц величин A и B :

$$[Q] = k [A] [B] ,$$

где k – безразмерный коэффициент.

Особенно удобно строить систему единиц так, чтобы коэффициент $k = 1$; в этом случае система единиц называется **когерентной** или согласованной.

Тогда же было предложено принимать за основные величины три – длину, массу, время; следовательно, и системы единиц строились на основе единиц длины, массы и времени.

Работы по международной унификации единиц стали более активными после подписания Международной метрической конвенции в 1875 году в Париже. В итоге была разработана метрическая система мер, которая стала первой системой связанных между собой единиц для измерений длины, площади, объема, массы. Однако с развитием науки и техники, с расширением круга измеряемых величин возникла необходимость в системах единиц, охватывающих более широкие совокупности единиц для определенных разделов физики.

Системой единиц физических величин называют совокупность основных и производных единиц величин, образованную в соответствии с принятыми принципами. При этом основные единицы системы выбираются произвольно, а затем на основе определяющих уравнений получают производные единицы. Первоначально были созданы системы единиц, основанные на трех основных единицах и охватывающие широкий круг механических величин. Наиболее распространены системы, основанные на единицах длины, массы и времени. Это, прежде всего, система МКС (основные единицы: метр, килограмм, секунда) и система СГС (сантиметр, грамм, секунда).

В качестве единицы времени принималась секунда, которая первоначально определялась как $1 / 86400$ часть средних солнечных суток, а затем была определена через тропический год.

По такому же принципу строятся системы единиц для других разделов физики; при этом к указанным выше основным единицам присоединяют одну из единиц электрических величин или термодинамических величин. Наиболее известные и распространенные на практике системы такого рода: практическая система электрических единиц, система МКСА (четвертая основная единица – ампер, единица силы тока), система тепловых единиц (получаемая добавлением единицы термодинамической температуры – канделы).

2.2 Международная система единиц СИ

2.2.1 Историческая справка

Многообразие систем единиц (а также и внесистемных единиц) создает трудности в научно-технических и экономических контактах. Необходимость в создании единой международной системы, которая включала бы в себя единицы всех разделов физики, возникла давно. Однако соглашение о введении такой системы было принято только в 1960 г. на XI Генеральной конференции по мерам и весам (Conference Générale des Poids et Mesures, CGPM) в 1960 г. [7]. Новая система, получила название системы СИ, в ней в качестве основных единиц приняты следующие:

- 1) метр – единица длины;
- 2) килограмм – единица массы;
- 3) секунда – единица времени;
- 4) ампер – единица силы тока;
- 5) градус Кельвина – единица термодинамической температуры;
- 6) свеча – единица силы света;
- 7) моль – единица количества вещества.

Кроме того, в СИ введены две дополнительные единицы:

- 1) радиан – единица плоского угла;
- 2)стерадиан – единица телесного угла.

Вновь введенная система СИ имеет ряд достоинств и преимуществ перед другими существующими ранее системами. Важнейшими из них являются:

- 1) универсальность, поскольку она охватывает все области измерений в науке, технике, экономике;
- 2) унификация единиц для всех видов измерений; например, вместо ряда единиц давления (атм, мм рт.ст., бар и др.) в СИ имеется единая единица давления – паскаль, вместо ряда единиц работы и энергии (эрг, кал, кВт.ч и др.) – одна единица работы и всех видов энергии – джоуль;

3) когерентность (согласованность) системы единиц СИ, в которой все производные единицы получены при помощи определяющих уравнений с числовыми коэффициентами 1;

4) удобные для практического применения (по размерам) как основные единицы, так и большинство производных единиц Международной системы; значительное число единиц СИ получило широкое распространение еще задолго до ее введения;

5) четкое разграничение в СИ единиц массы (килограмма) и силы (ньютонa);

6) упрощение записи многих уравнений и формул ввиду отсутствия переводных коэффициентов, обусловленных использованием различных систем единиц.

Кроме того, введение системы СИ упрощает обучение в школах и вузах, поскольку избавляет от необходимости изучать множество систем единиц. Это также способствует лучшему взаимопониманию при международных научно-технических и экономических контактах.

На всем пути развития цивилизации измерения были основой взаимоотношений людей между собой, с окружающей средой, природой и предметами. Мир, окружающий нас, – это прежде всего мир физических величин, реально существующих в широчайшем диапазоне их значений от микромира до макромира в масштабе Вселенной (табл. 1).

Табл. 1. Основные физические величины и их размерности

ВЕЛИЧИНА						ЕДИНИЦА					
НАИМЕНОВАНИЕ	Символ	Символ единицы	НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ		НАИМЕНОВАНИЕ	Символ	Символ единицы	НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	
				РУССКОЕ	Латинское					РУССКОЕ	Латинское
ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ						ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ					
ДЛИНА	l	-	Метр	м	m	ИМПУЛЬС СИЛЫ	I	$I=Ft$	Ньютон*секунда	N^*s	N^*s
МАССА	m	-	Килограмм	кг	kg	МОМЕНТ СИЛЫ	M	$M=Fl$	Ньютон*метр	N^*m	N^*m
ВРЕМЯ	t	-	Секунда	с	s	ДАВЛЕНИЕ	p	$p=F_{\perp}/S$	Паскаль	Па	Pa
СИЛА	F	-	Ампер	А	A	РАБОТА, ЭНЕРГИЯ	A, W	$A=F\cdot l$ $W=Pt$	Джоуль	Дж	J
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА	I	-	Ампер	А	A	МОЩНОСТЬ	$P, (N)$	$P=A/I$	Ватт	Вт	W
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА	T	-	Кельвин	К	K	КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ	Q	-	Джоуль	Дж	J
КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА	n	-	Моль	моль	mol	УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ	C	$C=Q/(m \cdot \Delta T)$	Джоуль на килограмм*Кельвин	Дж/(кг*К)	J/(кг*К)
СИЛА СВЕТА	I	-	Кандела	кД	cd	КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА	Q	$Q=It$	Кулон	Кл	C
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ						ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ	$U, (V)$	$U=P/I$	Вольт	В	V
ПЛОСКИЙ УГОЛ	α, φ	-	Радан	рад	rad	ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ	R	$R=U/I$	Ом	Ом	Ω
ТЕЛЕСНЫЙ УГОЛ	Ω, ω	-	Стерadian	ср	sr	УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ	ρ	$\rho=R\cdot S/l$	Ом*метр	Ом*м	Ω^*m
ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ						НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	E	$E=U/l$	Вольт на метр	В/м	V/m
ПЛОЩАДЬ	S	$S=l^2$	Квадратный метр	m^2	m^2	ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ	C	$C=Q/U$	Фарад	Ф	F
ОБЪЕМ, ВМЕСТИМОСТЬ	V	$V=l^3$	Кубический метр	m^3	m^3	МАГНИТНЫЙ ПОТОК	Φ	$\Phi=B\cdot S$	Вебер	Вб	Wb
ЧАСТОТА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	$\{V\}f$	-	Герц	Гц	Hz	МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	B	$B=\Phi/S$	Тесла	Тл	T
ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ	n	-	Секунд в минус первой степени	с-1	s-1	ИНДУКТИВНОСТЬ	L	$L=\Phi/I$	Генри	Гн	H
СКОРОСТЬ	v	$v=S/t$	Метр в секунду	м/с	m/s	СВЕТОВОЙ ПОТОК	Φ	$\Phi=J^*w$	Люмен	Лм	lm
УСКОРЕНИЕ	a	$a=(\Delta v)/t$	Метров за секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²	СВЕТОВАЯ ЭНЕРГИЯ	Q	$Q=\Phi\cdot t$	Джоуль*секунда	лм*с	lm*s
УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ	w	$w=\alpha/l$	Радан в секунду	рад/с	rad/s	ОСВЕЩЕННОСТЬ	E	$E=\Phi/S$	Люкс	Лк	lx
ПЛОТНОСТЬ	ρ	$\rho=m/V$	Килограмм на кубический метр	кг/м	kg/m	ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ (ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ)	Dn	$Dn=W/m$	Грей	Гр	Gy
КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ (ИМПУЛЬС)	P	$P=m\cdot V$	Килограмм*метр в секунду	кг*м/с	kg*m/s	АКТИВНОСТЬ НУКЛИДА В РАДИОАКТИВНОМ ИСТОЧНИКЕ	A	$A=n/t$	Беккерель	Бк	Bq
СИЛА	F	$F=m\cdot a$	Ньютон	Н	N						

Далее была создана система единиц на основе фундаментальных констант. Идею создания подобных эталонов высказал еще Джеймс Клерк Максвелл в 1870 г. Связь фундаментальных констант с единицами системы СИ представлена в табл. 2.

Таким образом, дальнейшее развитие эталонов пошло по пути создания высокоточных технических устройств, позволяющих воспроизводить единицу физической величины и ее передачу для сличения.

Эталон, воспроизводящий единицу физической величины с наивысшей точностью, достигнутой в данной области измерений, называют первичным.

Первичный эталон, утвержденный в качестве исходного средства измерений для страны, называется государственным.

Таблица 2. Связь фундаментальных констант с единицами системы СИ

Наименование величины	Основная единица СИ			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международ.	русское	
Длина	метр	m	м	Метр есть длина пути, пройденного светом в вакууме за интервал времени $1/299792458$ секунды [17 ГКМВ (1983 г.), Резолюция 1]
Масса	килограмм	kg	кг	Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма [3 ГКМВ (1901 г.), Резолюция 3]
Время	секунда	s	с	Секунда есть время, равное 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [13 ГКМВ (1967 г.), Резолюция 1]
Сила электрического тока	ампер	A	А	Ампер есть сила не изменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона [МКМВ (1946 г.), Резолюция 2, одобренная 9 ГКМВ (1948 г.)]
Термодинамическая температура	кельвин	K	К	Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды [13 ГКМВ (1967 г.), Резолюция 4]
Количество вещества	моль	mol	моль	Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ килограмма. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц [14 ГКМВ (1971 г.), Резолюция 3]
Сила света	кандела	cd	кд	Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ ватт на стерадиан [16 ГКМВ (1979 г.), Резолюция 3]

Наивысшую точность имеют эталоны, хранимые в международном бюро мер и весов, остальные государственные эталоны сличаются с ними. По приоритету воспроизведения и хранения единицы первичному эталону соподчиняются вторичные эталоны.

Вторичные эталоны подразделяют на эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны. Эталоны сравнения, главным образом, предназначены для сличения государственного эталона с другими, в том числе международными эталонами.

Рабочий эталон – вторичный эталон, применяемый для хранения и передачи единицы средствам измерений 1-го разряда. Единица от эталона первого разряда передается эталону 2-го разряда. Эталоны первого и второго

разрядов производятся серийно и могут находиться на промышленных предприятиях для поверки и калибровки рабочих средств измерений.

Для обеспечения передачи размера единиц физических величин во всех звеньях метрологической цепи создается поверочная схема.

2.2.2 Определения основных единиц системы СИ

1. Метр (м) – единица длины.

Метр равен длине 11650763,73 волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между энергетическими уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

2. Килограмм (кг) – единица массы.

Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

3. Секунда (с) – единица времени.

Секунда равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

4. Ампер (А) – единица силы тока.

Ампер равен силе постоянного тока, который при прохождении через два параллельных прямолинейных проводника, расположенных на расстоянии 1 м (в вакууме), вызывает силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н на участке длиной 1 м.

5. Кельвин (К) – единица термодинамической температуры.

Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. В кельвинах выражается также интервал или разность температур.

6. Кандела (кд) – единица силы света.

Кандела равна силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600000$ м² полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па.

7. Моль (моль) – единица количества вещества.

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же частиц (атомов, молекул, ионов и др.), сколько атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг.

Определения основных единиц системы СИ (за исключением единицы массы – килограмма) основаны на стабильных физических явлениях. Поэтому единицы могут воспроизводиться с высокой точностью независимо в различных странах и метрологических организациях. К сожалению, определение килограмма на основе физических явлений пока не позволяет обеспечить требуемую точность воспроизведения, и потому единица массы определена как масса международного прототипа килограмма.

2.2.3 Производные единицы СИ

Производные единицы СИ образуются из основных и дополнительных единиц при помощи определяющих уравнений (известных из соответствующих разделов физики).

Например, если величина Q есть произведение величин L (длины), M (массы) и T (времени) в некоторых степенях:

$$Q = L^a M^b T^c,$$

то единица величины Q определяется как произведение единиц величин L , M , T в соответствующих степенях:

$$[Q] = [L]^a [M]^b [T]^c.$$

Отметим, что в выражении для единицы не вводится безразмерный коэффициент k , поскольку система СИ когерентна.

При образовании производных единиц СИ, как правило, полученная единица имеет наименование, состоящее из наименований соответствующих исходных единиц.

Например, единица скорости вводится на основе определяющего уравнения:

$$v = s / t,$$

где v – скорость, s – длина пройденного пути, t – время движения.

Поэтому за единицу скорости в системе СИ принят метр в секунду (м/с), равный скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой она за время 1 с проходит путь длиной 1 м.

Аналогично, единица ускорения вводится на основе определяющего уравнения:

$$a = v / t,$$

где a – ускорение, v – скорость, t – время движения.

Если скорость v выражена в метрах в секунду, а время t – в секундах, то ускорение a выражается в метрах на секунду в квадрате (м/с²). Поэтому единица ускорения – метр на секунду в квадрате (м/с²) – ускорение прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с ее скорость увеличивается на 1 м/с.

Для наиболее важных производных единиц СИ приняты собственные наименования, в большинстве случаев – по именам ученых. Так, частота периодического процесса (или колебаний) определяется согласно уравнению:

$$f = 1 / T,$$

где f – частота, T – время завершения одного цикла или полного колебания.

Если время T выражено в секундах, то частота f выражается в герцах (Гц). Единица частоты СИ – герц – частота периодического процесса, при котором за время 1 с происходит один цикл периодического процесса.

Единица силы вводится в соответствии с определяющим уравнением:

$$F = m a,$$

где F – сила, действующая на тело, m – масса тела, a – ускорение, приобретаемое телом под воздействием силы.

Если масса m выражена в килограммах, ускорение a в метрах на секунду в квадрате, то сила выражается в ньютонах (Н).

Единица силы СИ – ньютон – сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.

Уравнение для силы тяжести

$$P = m g,$$

где g – ускорение свободного падения.

Давление определяется согласно уравнению:

$$p = F / S,$$

где p – давление на поверхность, F – сила, приложенная нормально к поверхности, S – площадь поверхности. Если сила F выражена в ньютонах, площадь S в квадратных метрах, то давление p выражается в паскалях (Па).

Единица давления СИ – паскаль (Па) – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 , нормальной к ней.

Для выражения работы и всех видов энергии (механической, тепловой, электрической, световой и др.) в СИ установлена единая единица – джоуль (Дж), равный работе силы 1 Н при перемещении точки ее приложения на расстояние 1 м по направлению действия силы.

Определяющее уравнение для работы:

$$A = F l,$$

где A – работа по перемещению точки, F – сила, приложенная к точке, l – расстояние, пройденное точкой.

Если сила F выражена в ньютонах, расстояние l в метрах, то работа A выражается в джоулях.

Мощность определяется согласно уравнению:

$$P = A / t,$$

где P – мощность, A – работа, выполненная за время t .

Если работа A выражена в джоулях, а время t – в секундах, то мощность P выражается в ваттах (Вт).

Выше приведены единицы СИ для некоторых наиболее распространенных механических величин. Аналогично определяются производные единицы для тепловых, электрических и магнитных величин, и др.

2.2.4 Кратные и дольные единицы СИ

В измерительной практике диапазон измеряемых величин весьма широк, и потому необходимы также кратные и дольные единицы. В Международной системе допускаются десятичные кратные и дольные единицы, образованные из соответствующих единиц системы путем умножения или деления на степень 10 с

целым показателем. Для образования кратных и дольных единиц используются специальные приставки (см. табл. 3) [11].

Таблица 3. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка	Обозначение		Примеры	
		русск.	межд.	название	обозн
10^{18}	экса	Э	E	эксагерц	EHz
10^{15}	пэта	П	P	петагерц	PHz
10^{12}	тера	Т	T	тераджоуль	TJ
10^9	гига	Г	G	гиганьютон	GN
10^6	мега	М	M	мегаом	MΩ
10^3	кило	К	k	киловатт	kW
10^2	гекто	Г	h	гектоватт	hW
10^1	дека	да	da	декалитр	dal
10^{-1}	деци	д	d	дециметр	dm
10^{-2}	санتي	с	c	сантиметр	cm
10^{-3}	милли	м	m	миллиампер	mA
10^{-6}	микро	мк	μ	микровольт	μV
10^{-9}	нано	н	n	нановольт	nV
10^{-12}	пико	п	p	пикофарада	pF
10^{-15}	фемпто	ф	f	фемтограмм	fg
10^{-18}	атто	а	a	аттокулон	aC

Правила написания кратных и дольных единиц.

1) Обозначение приставки пишется слитно с обозначением единицы, к которой она присоединяется.

2) Приставки можно присоединять только к простым наименованиям единиц, не содержащим приставок. Присоединение двух и более приставок не допускается. Например: следует применять наименование “пикофарада”, а не “микромикрофарада”.

При образовании кратных или дольных единиц от единицы массы (килограмма) новую приставку присоединяют к наименованию “грамм” (например: миллиграмм $1 \text{ мг} = 10^{-3} \text{ г} = 10^{-6} \text{ кг}$, мегаграмм $1 \text{ Мг} = 10^6 \text{ г} = 10^3 \text{ кг}$).

Следует отметить, что не все приставки и соответствующие кратные и дольные единицы широко используются на практике; во многих случаях большую роль играет традиция. Например, не нашли применения наименования декаметр и гектометр, а также мегаметр и гигаметр (хотя формально они и были бы возможны), однако широко применяется километр.

Приставки дека, гекто, деци и санти применяются сравнительно редко (например, для измерений мощности электрических приборов используют киловатт, а не гектоватт); однако в некоторых случаях они прочно вошли в жизнь, например, сантиметр, гектар (при этом надо отметить, что исходная единица $1 \text{ ар} = 100 \text{ м}^2$ практически не применяется).

Особым образом образуются кратные единицы времени; в этом случае используют не десятичные кратные секунде, а исторически сложившиеся единицы: $1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$; $1 \text{ ч} = 60 \text{ мин} = 3600 \text{ с}$; $1 \text{ сутки} = 24 \text{ ч} = 86400 \text{ с}$.

В то же время для образования дольных единицы секунды применяют десятичные коэффициенты, например: миллисекунда ($1 \text{ мс} = 10^{-3} \text{ с}$), микросекунда ($1 \text{ мкс} = 10^{-6} \text{ с}$).

Многие единицы физических величин имеют собственные наименования. К их числу относятся основные и дополнительные единицы, а также наиболее распространенные производные единицы, например: ньютон (единица силы), паскаль (единица давления), джоуль (единица работы или энергии) и др.

Если производная единица не имеет собственного наименования, то ее наименование получается из наименований основных, дополнительных и имеющих собственные наименования производных единиц. Если производная единицы образуется как произведение единиц, то ее наименование записывается через дефис; например: ньютон-метр (единица момента силы), ампер-квадратный метр (единица магнитного момента).

Если производная единица представляет собой частное от деления одних единиц на другие, то наименования этих единиц связываются предлогом «на»; например: вольт на метр (единица напряженности магнитного поля), метр на секунду в квадрате (единица ускорения). Исключение составляют единицы величин, характеризующих скорость протекания процессов и зависящих от времени в первой степени, например: метр в секунду (единица скорости), радиан в секунду (единица угловой скорости).

Для обозначения единиц применяются буквы или специальные знаки, причем устанавливают два вида буквенных обозначений – русские и международные (с применением латинского и греческого алфавитов). При этом в одном тексте (или в одной работе) допускается применять лишь один вид обозначений – русский или международный.

При записи величин обозначения единиц помещают сразу после числовых значений величин (на той же строке). Исключение составляют перечисление нескольких одноименных величин или указание предельных значений величины. В этих случаях обозначение единицы приводится один раз, после всех значений (причем без скобок); например: $20 + 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 2, 3 и 4 м. Аналогично указываются обозначения единиц в заголовках граф и наименованиях строк таблиц и выводов.

В обозначениях единиц точка как знак сокращения не применяется, однако имеется ряд исключений: мм рт.ст., л.с.

Обозначения единиц, наименования которых образованы от имен ученых, пишутся с заглавной буквы; например: Н (ньютон – единица силы), Вт (ватт – единица мощности).

В обозначениях сложных производных единиц предпочтительно использование точки как знака умножения и косой черты как знака деления; например: $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Выводы

В течение последних трех веков сформировалась система физических величин, необходимая для мирового развития промышленного производства и торговли. Передача размера физических единиц выполняется путем сличения значения измеряемой величины с эталоном. Эталонирование производится путем передачи значения величины от международного, самого точного эталона к рабочему, имеющему класс точности, необходимый для обеспечения решаемой измерительной задачи. Значение физической величины передается путем многоступенчатого сличения между собой нескольких эталонов, находящихся в различных организациях от госстандарта до промышленных предприятий. Развитие этой системы обусловлено диалектической потребностью в измерениях физических величин как в промышленно развитых странах, так и в странах с развивающейся экономикой.

Вопросы для самопроверки

1. Расскажите об этапах развития метрологии в мире.
2. Расскажите о заслугах Д.И. Менделеева перед отечественной метрологией.
3. Назовите основные единицы системы СИ.
4. Как образуются производные единицы из основных?
5. Каким множителям соответствуют приставки "микро" и "нано"?

*Мудрено пишут только о том, чего не понимают
Василий Осипович Ключевский*

3. ТЕРМИНОЛОГИЯ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

3.1 Термины и определения в области метрологии

Дадим определения метрологическим понятиям, элементам и изделиям измерительной техники в соответствии с рекомендациями по межгосударственной стандартизации РМГ 29 «Метрология. Основные термины и определения», введенными в действие в 2014 г. [3].

Следует отметить, что указанный документ является основным документом прямого действия, определяющим терминологию в области измерительной техники. Он состоит из следующих разделов:

- Метрология и ее разделы;
- Величины и единицы;
- Измерения;
- Результаты измерений;
- Средства измерительной техники;
- Свойства и метрологические характеристики средств измерений;
- Эталоны;
- Метрологическая прослеживаемость.

В каждом из этих разделов приводятся формулировки терминов измерительной техники в указанной области. Рассмотрим некоторые из них.

Метрология: Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Законодательная метрология: Раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и требуемой точности измерений.

Теоретическая метрология: Раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии.

Практическая (прикладная) метрология: Раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

РМГ 29 дают определение таких понятий, как величина, размер величины, значение величины, система величин, числовое значение. Не будем останавливаться на этих терминах в связи с тем, что их определения достаточно тривиальны. Более сложными понятиями являются нижеследующие.

Основная величина: Одна из величин подмножества, условно выбранного для данной системы величин так, что никакая из величин этого подмножества не может выражаться через другие величины.

Производная величина: Величина, входящая в систему величин и определяемая через основные величины этой системы.

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

Шкала (значений) величины; шкала измерений: Упорядоченная совокупность значений величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

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

Измерение (величины): Процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине.

Примечание 1. Измерение подразумевает сравнение величин или включает счет объектов.

Примечание 2. Измерение предусматривает описание величины в соответствии с предполагаемым использованием результата измерения, методику измерений и средство измерений, функционирующее в соответствии с регламентированной методикой измерений и с учетом условий измерений.

Измерительная система; ИС: Совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту

Пример 1. Измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о ряде величин в разных энергоблоках. Она может содержать сотни измерительных каналов.

Пример 2. Радионавигационная система для определения местоположения различных объектов, состоящая из ряда измерительно-вычислительных комплексов, разнесенных в пространстве на значительное расстояние друг от друга.

Примечание. Измерительная система в зависимости от решаемой измерительной задачи может рассматриваться как единое средство измерений.

Измерительный прибор: Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия

Пример. Вольтметр, микрометр, термометр, электронные весы.

Примечание 1. Измерительный прибор, в котором сигнал измерительной информации представлен в визуальной форме, называют показывающим измерительным прибором.

Примечание 2. Сигнал измерительной информации может быть представлен в визуальной, звуковой или другой заданной форме. Он также может быть передан одному или нескольким другим средствам измерений.

Примечание 3. Измерительный прибор может быть эталоном.

Измерительный преобразователь; ИП: Средство измерений или его часть, служащее для получения и преобразования информации об измеряемой величине в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Мера (материальная): Средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов с приписанными им значениями.

Пример. Эталонная гиря, мера вместимости (которая сохраняет одно или несколько значений величины, со шкалой значений величины или без нее), эталонный резистор, линейная шкала (линейка), концевая мера длины, эталонный генератор сигналов, меры твердости (минералы различной твердости по шкале Мооса), аттестованный стандартный образец.

Примечание. Материальная мера может быть эталоном.

Измерительный преобразователь; ИП: Средство измерений или его часть, служащее для получения и преобразования информации об измеряемой величине в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Пример. Термопара, трансформатор электрического тока, тензодатчик, электрод для измерения рН, трубка Бурдона, биметаллическая пластина.

Чувствительный элемент; первичный измерительный преобразователь; сенсор: Измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует материальный объект или явление, являющееся носителем величины, подлежащей измерению.

Пример. Чувствительная катушка платинового термометра сопротивления, ротор турбинного расходомера, трубка Бурдона в манометре, поплавков уровнемера, фотоэлемент спектрометра, термотронный жидкий кристалл, который изменяет цвет в зависимости от температуры.

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

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

РМГ 29 являются одним из основополагающих документов в области метрологии, в связи с этим мы будем обращаться к нему и в дальнейшем, по мере обсуждения различных аспектов метрологии.

3.2 Классификация измерений

Выделяются нижеследующие виды измерений физических величин.

- Равноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью. Отметим, что прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными.
- Неравноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях. Отметим, что неравноточные измерения обрабатывают с учетом веса отдельных измерений, входящих в ряд.
- Однократное измерение – измерение, выполненное один раз.
- Многократное измерение – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоит из ряда однократных измерений.
- Статическое измерение – измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.
- Динамическое измерение – измерение изменяющейся по размеру физической величины.
- Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Например, измерение силы падающего на землю тела $F=mg$ основано на измерении основной величины (массы) и использовании физической постоянной g .
- Относительное измерение – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.
- Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно. Отметим, что термин «прямое» возник в противоположность термину «косвенное».
- Косвенное измерение – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Отметим, что косвенное измерение предполагает наличие методических погрешностей в его результатах.

- Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяются путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. Отметим, что для определения значений искомых величин число уравнений должно быть не меньше числа величин.
- Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними.

Выводы

Целеполагание различных разделов метрологии привело к ее разделению на законодательную, теоретическую и практическую. Необходимость в однозначном понимании роли отдельных элементов измерительных преобразователей и приборов, а также измерительных процедур привела к появлению терминов измерительной техники, которые являются общепринятыми и закрепленными в РМГ 29. Использование этих терминов обязательно для всех технических специалистов во всех известных документах.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение основной и производной величинам.
2. Что такое первичный измерительный преобразователь?
3. Дайте определение меры.
4. Что такое статическое измерение и чем оно отличается от динамического?
5. Что такое прямое и косвенное измерение?

*Свои ошибки можно не исправлять,
достаточно их учесть
Метрологическая мудрость*

4. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

4.1 Виды погрешностей и особенности терминологии в соответствии с РМГ 29

Точные формулировки большинства метрологических терминов дают РМГ 29. Чрезвычайно важно строго использовать терминологию и пользоваться только общепринятыми терминами, так как в их содержании заключены особенности выражения результатов расчета, свойств физических явлений или материальных объектов.

Например, часто подменяются понятия «погрешность средств измерений» и «погрешность результата измерений». Это не одно и то же. Инструментальная погрешность измерения является составляющей погрешности, обусловленной погрешностью применяемого средства измерений [3]. Погрешность результата измерения – это разность между измеренным значением величины и опорным значением величины. При этом РМГ 29 поясняет, что, если опорное значение величины известно, как, например, при калибровке средств измерений, то известно и значение погрешности измерения. Если в качестве опорного значения выступает истинное значение величины, то значение погрешности неизвестно. Таким образом, во многих случаях нельзя подменять понятия или определять погрешность измерения как погрешность средства измерения.

Термин **метод измерения** связан с термином **методическая погрешность**. В соответствии с РМГ 29 под методом измерений понимается прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей или соотнесение со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений. При этом принцип измерения – это явление материального мира, положенное в основу измерения.

Наиболее простым методом измерений является метод непосредственной оценки. Это метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

Погрешность метода измерений или методическая погрешность – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений. Очевидно, что величину инструментальной погрешности можно узнать из паспорта прибора. Оценка значения методической погрешности является более сложной процедурой. Очень часто причиной возникновения методической погрешности является то, что, организуя измерения, инженеры нередко вынуждены измерять не ту величину,

которая в принципе должна быть измерена, а некоторую другую, близкую, но не равную ей. Этот прием замены позволяет создавать наиболее простые, надежные и универсальные приборы. Наглядный пример этого – выбор метода построения прибора для измерения запаса горючего в баке автомобиля. Ясно, что суммарная энергия, запасенная в топливе, определяется его массой (а не объемом), и для ее измерения нужны весы. Но совмещение топливного бака с весовым механизмом резко усложняет конструкцию. Поэтому разработчик заменяет весы простейшим поплавковым уровнемером, хотя уровень топлива зависит и от наклона бака, и от температуры и лишь весьма приблизительно отражает массу топлива. Автомобилисты знают, что летом на жаре бензин расходуется быстрее, так как при той же массе имеет больший объем.

Еще один пример – это измерение напряжения вольтметром. Вследствие шунтирования входным сопротивлением вольтметра того участка цепи, на котором измеряется напряжение, оно оказывается меньшим, чем было до присоединения вольтметра. Поэтому на низкоомных участках цепи эта погрешность ничтожна, а на высокоомных может быть очень значительной.

К методическим погрешностям относятся все погрешности, которые могут быть определены и количественно оценены с помощью математической модели измерительной процедуры. Количественная оценка погрешностей и их характеристик при этом выполняется на основе расчетов или имитационного моделирования. Таким образом, отличительной особенностью методических погрешностей является то, что они могут быть определены лишь путем создания математических моделей или имитационным моделированием измеряемого объекта и не могут быть найдены сколь угодно тщательным исследованием лишь самого измерительного прибора.

Особенности терминов **основная** и **дополнительная погрешности** заключаются в следующем. Основная погрешность – это погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях. Дополнительная погрешность – это составляющая погрешности, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

Очевидно, что любой прибор работает в сложных, изменяющихся во времени условиях. Изменение этих условий в том случае, если они влияют на прибор (например, температуры, влажности, вибрации, напряжения питания и др.) приводит к изменению показаний прибора. Таким образом, интересующий нас единственный фактор из всего множества факторов, влияющих на прибор, мы называем измеряемой величиной. При проектировании прибора мы стремимся к тому, чтобы влияние всех остальных факторов на показания прибора было минимальным. При аттестации или градуировке прибора в лабораторных условиях все значения влияющих величин могут поддерживаться в узких

пределах. Такие условия, оговоренные в технической документации, называются нормальными. В соответствии с РМГ 29 под нормальными условиями измерений понимаются условия измерений, характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости.

Следует отметить, что дополнительная погрешность нормируется и соотносится с режимами работы прибора. Так авиационные приборы имеют рабочий диапазон при температуре от +60 до – 80 градусов Цельсия, морские приборы должны работать при влажности 100 %, и т.д. Рабочая область значений влияющей величины определяется в РМГ 29 как область, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменение показаний средства измерений. Нормирование дополнительной погрешности во многих случаях производят путем указания коэффициентов влияния, например $\gamma_{\text{доп}} = \psi \Delta\theta$, где ψ – коэффициент влияния, $\Delta\theta$ – отклонение от нормальных условий.

Погрешности делятся на **статические и динамические** по критерию режима работы прибора, в котором они возникают. Эти погрешности присущи как средствам, так и методам измерений. Их различают по зависимости от скорости изменения измеряемой величины с течением времени. Статическая погрешность – это погрешность средства измерения, возникающая при измерении физической величины, принимаемой за неизменную. Динамическая погрешность – погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины. Таким образом, динамические погрешности являются одной из разновидностей дополнительных погрешностей. Вы уже знаете, что они имеют специфические методы нормирования и расчета.

По методу представления погрешности делятся на систематические и случайные погрешности. РМГ 29 дают следующие определения. **Систематическая погрешность** результата измерения – это составляющая погрешности результата измерений, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. **Случайная погрешность** измерения – это составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же физической величины, проведенных с одинаковой тщательностью. Основным отличительный признак систематических погрешностей состоит в том, что они могут быть предсказаны и благодаря этому почти полностью устранены. Отличительная черта случайных погрешностей – это их непредсказуемость от одного отсчета к другому. Как правило, они проявляются в виде разброса значений относительно некоторой величины. Следует отметить, что систематическая погрешность определенного средства измерения, как правило, будет отличаться от систематической погрешности другого экземпляра средства измерения такого же типа, вследствие чего для

группы однотипных средств измерений систематическая погрешность может иногда рассматриваться как случайная погрешность.

Систематические погрешности, в свою очередь, подразделяются в зависимости от характера измерения на постоянные, прогрессивные, периодические и изменяющиеся по сложному закону. Постоянные погрешности – погрешности, которые сохраняют свое значение длительное время, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений. Прогрессивные погрешности, в соответствии с РМГ 29, – это непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора. Что касается погрешностей, изменяющихся по сложному закону, то они происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

Кроме указанных терминов, часто используются термины **неисключенная систематическая погрешность, погрешность калибровки и вариация показаний**. Во многих случаях при калибровке прибора получают ряд точек, по этим точкам проводят плавную среднюю кривую, которую и принимают за характеристику. Систематически наблюдающиеся отклонения от выбранной в качестве характеристики плавной кривой в общем случае определяются как погрешность адекватности выбранной функциональной зависимости фактической характеристике прибора. РМГ 29 определяют неисключенную систематическую погрешность как «составляющую погрешности результата измерений, обусловленную погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена вследствие ее малости». Если в качестве характеристики выбрана прямая линия, то неисключенная систематическая погрешность будет носить характер погрешности от линейности характеристики. В том случае, если неисключенная систематическая погрешность меняет знак, то она может быть охарактеризована как погрешность от гистерезиса или вариации. Такая погрешность во многих случаях обусловлена зоной нечувствительности прибора [12]. Под вариацией показаний измерительного прибора понимается разность его показаний в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины (рис. 1).



Рисунок 1. Погрешность от вариации показаний

Наряду с определениями погрешностей существует термин **неопределенность измерений**. Интеграция России в международное сообщество привело к широкому распространению этого термина. Страны, подписавшие международную конвенцию по мерам и весам, длительное время уже используют этот термин, который употребляется и в стандартах ISO. Существуют и общепринятые методы оценки неопределенности [13].

Понятие неопределенности появилось именно в связи с оценкой точности результата испытания, которую действительно иначе как неопределенностью не охарактеризуешь. Отметим, что точность – величина, обратная погрешности. Очевидно, что при испытаниях чего-либо, например, образца материала на разрыв или прибора на воздействие температуры, мы не имеем возможности сличения измеряемого параметра с эталоном: например, задаем температуру в камере, а регистрируем выходное напряжение с прибора.

В дальнейшем этот термин получил развитие. Сегодня неопределенность измерения трактуется в двух смыслах: в широком и узком.

В широком смысле «неопределенность» трактуется как «сомнение», например: «... когда все известные или предполагаемые составляющие погрешности оценены, а систематические внесены в соответствующие поправки, все еще остается неопределенность относительно истинности указанного результата, то есть сомнение в том, насколько точно результат измерения представляет значение измеряемой величины».

В узком смысле неопределенность измерения есть «параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине». РМГ 29 трактует неопределенность измерений как неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации.

4.2 Термины, позволяющие нормировать погрешности средств измерений

В первую очередь к ним относятся **абсолютная, относительная и приведенная погрешности средств измерений**.

Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины, есть абсолютная погрешность. Следует отличать абсолютную погрешность от абсолютного значения погрешности. Абсолютное значение погрешности – это значение погрешности без учета ее знака (модуль погрешности). Относительная погрешность – это погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины. Относительная погрешность обычно выражается в процентах и рассчитывается по формуле $\delta = \frac{\Delta x}{x} 100\%$, где Δx – абсолютная

погрешность измерений; x – действительное или измеренное значение величины. Приведенная погрешность средства измерения, в соответствии с РМГ 29, есть относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона. Таким образом, это отношение абсолютной погрешности к протяженности диапазона измерения, выраженное в процентах.

Под **точностью измерения** понимается качество измерения, отражающее близость его результата к истинному значению измеряемой величины. Измерение тем точнее, чем меньше его погрешность. Поэтому точность можно количественно охарактеризовать числом, равным обратному значению относительной погрешности результата измерения. Однако такая количественная характеристика на практике применяется довольно редко; обычно принято точность измерения указывать через его погрешность.

Нередко при описании погрешностей встречаются термины **аддитивные** и **мультипликативные погрешности**.

Аддитивные погрешности не зависят от уровня измеряемых сигналов. Погрешность возникает от сдвига статической характеристики прибора, угол наклона при этом остается неизменным (рис. 2а). Мультипликативные погрешности характеризуются постоянным приращением наклона характеристики (рис. 2б).

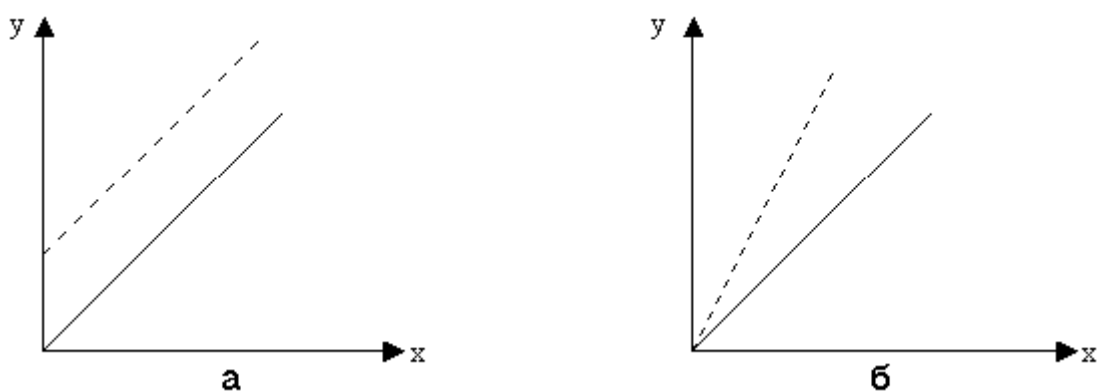


Рисунок 2. Аддитивная (а) и мультипликативная (б) погрешности

Эти погрешности применимы как к случайным, так и к систематическим погрешностям. Примерами систематической аддитивной погрешности являются погрешность от постороннего груза на чашке весов, погрешность от смещения стрелки шкального механизма при ее нулевом положении. Примерами случайных аддитивных погрешностей являются погрешность от наводки переменной ЭДС на вход прибора, погрешности от тепловых шумов и т.д. Примерами

мультипликативной погрешности могут быть изменение коэффициента усиления усилителя при его прогреве, дрейф нуля интегратора и т.д.

4.3 Методы нормирования погрешностей средств измерений. Класс точности приборов

Для того чтобы ориентироваться в метрологических свойствах конкретного средства измерения, чтобы заранее оценить погрешность, которую внесет данный прибор в конкретный результат, пользуются так называемыми нормированными значениями погрешности. Под нормированным значением понимаются погрешности, являющиеся предельными для данного типа средств измерений. При этом как систематическая, так и случайная составляющие погрешности отдельных экземпляров приборов одного и того же типа могут различаться, однако в целом для этого типа средств измерений погрешности не превосходят гарантированного значения. Таким образом, нормируются основная и дополнительная погрешности. Именно эти границы основной погрешности, а также коэффициентов влияния и заносятся в паспорт каждого экземпляра прибора. Вся процедура нормирования погрешностей средств измерений, основывается на системе стандартов, обеспечивающих единство измерений.

Класс точности – это обобщенная характеристика данного типа средств измерений, как правило, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Основные способы установления допускаемых погрешностей и обозначения классов точности средств измерений установлены ГОСТ 8.401.

Основная погрешность средства измерения нормируется четырьмя различными способами. Различие в способах нормирования обусловлено разным соотношением аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности тех или иных средств измерения.

Чисто мультипликативная полоса погрешностей средств измерения. В этом случае абсолютная погрешность $\Delta(x)$ возрастает прямо пропорционально текущему значению x измеряемой величины. Поэтому относительная погрешность, т. е. погрешность чувствительности такого преобразователя, $\gamma_s = \Delta(x)/x$ оказывается постоянной величиной при любом значении x , и ее удобно использовать для нормирования погрешностей преобразователя и указания его класса точности [9]. Таким способом нормируются погрешности масштабных преобразователей (делителей напряжения, шунтов, измерительных трансформаторов тока и напряжения и т. п.). Их класс точности указывается в виде значения γ_s , выраженного в процентах. Граница относительной погрешности результата измерения $\gamma(x)$ в этом случае постоянна и при любом x просто равна значению γ_s , а абсолютная погрешность результата измерения рассчитывается по формуле $\Delta(x) = \gamma_s(x)$.

Если бы эти соотношения оставались справедливыми для всего диапазона возможных значений измеряемой величины x от 0 до X_k (X_k – предел диапазона измерений), то такие измерительные преобразователи были бы наиболее совершенными, так как они имели бы бесконечно широкий рабочий диапазон, т.е. обеспечивали бы с той же погрешностью измерение сколь угодно малых значений x . Однако реально таких преобразователей не существует, так как невозможно создать преобразователь, полностью лишенный аддитивных погрешностей. Эти погрешности от шума, дрейфа, трения, наводок, вибраций и т. п. неизбежны в любых типах СИ. Поэтому для реальных СИ, погрешность которых нормируется лишь одним числом – погрешностью чувствительности γ_s , всегда указываются границы рабочего диапазона, в которых такая оценка остается приближенно справедливой.

Чисто аддитивная полоса погрешностей. В этом случае нормировать абсолютное значение погрешности от нечувствительности (вблизи нуля) Δ_0 неудобно, так как для многопредельных приборов оно будет различным для каждого поддиапазона, и в паспорте прибора пришлось бы перечислять эти значения для всех поддиапазонов.

Поэтому нормируют не абсолютное Δ_0 , а приведенное значение этой погрешности: $\gamma_0 = \Delta_0 / X_k$, где X_k – так называемое нормирующее значение измеряемой величины. ГОСТ 8.401 определяет для приборов с равномерной или степенной шкалой нормирующее значение X_k равным верхнему пределу диапазона измерений, в том случае, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы. Если же нулевая отметка находится посередине шкалы, то X_k равно протяженности диапазона измерений (например, для амперметра со шкалой от -30 А до $+60$ А значение $X_k = 60 - (-30) = 90$ А. Значение приведенной погрешности γ_0 , выраженное в процентах, используется для обозначения класса точности таких СИ. Однако полагать, как уже указывалось, что вольтметр класса точности 1,0 обеспечивает во всем диапазоне измерений получение результатов с погрешностью $\pm 1\%$ – грубейшая ошибка. В действительности текущее значение относительной погрешности $\gamma(x) = \Delta_0 / x$, т. е. растет обратно пропорционально x и изменяется по гиперболе (рис. 3). Таким образом, относительная погрешность $\gamma(x)$ равна классу точности прибора γ_0 лишь на последней отметке шкалы (при $x = X_k$). При $x = 0,1X_k$ она в 10 раз больше γ_0 , а при дальнейшем уменьшении x стремится к бесконечности.

При уменьшении измеряемой величины x до значения абсолютной погрешности вблизи нуля Δ_0 относительная погрешность результата измерения достигает 100%. Такое значение измеряемой величины называется **порогом чувствительности** СИ. РМГ 29 дают следующее определение. Порог чувствительности – это характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством измерения.

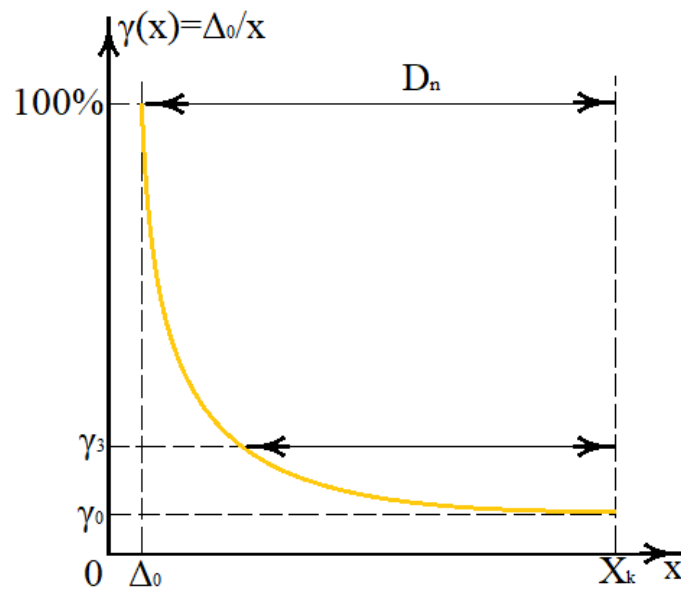


Рисунок 3. Графическое изображение диапазона измерений

Очевидно, что *диапазон* измеряемых величин D_n (рис. 3) для любого преобразователя ограничивается снизу порогом чувствительности, а сверху — пределом измерений. Так как в области малых значений x погрешность измерений очень велика, то рабочий диапазон D_p ограничивают снизу таким значением x , где относительная погрешность измерений $\gamma(x)$ не превосходит еще некоторого заранее заданного значения γ_z , равного, например, 4, 10 или 20%. Таким образом, рабочий диапазон назначается достаточно произвольно (рис. 3) и составляет только некоторую часть полного диапазона СИ. В начальной же части шкалы измерения недопустимы, в чем и заключается отрицательное влияние аддитивной погрешности, не позволяющее использовать один и тот же преобразователь для измерения как больших, так и малых измеряемых величин.

Одновременное присутствие аддитивной и мультипликативной составляющих. В этом случае полоса погрешностей имеет форму (рис. 4а), а текущее значение абсолютной погрешности $\Delta(x)$ в функции измеряемой величины x описывается соотношением

$$\Delta(x) = \Delta_0 + \gamma_s x \quad (1)$$

где Δ_0 — аддитивная, а $\gamma_s x$ — мультипликативная составляющие абсолютной погрешности.

Если все члены уравнения (1) разделить на предел измерений X_k , то для приведенного значения погрешности получим [8]:

$$\gamma_{np}(x) = \frac{\Delta(x)}{x_k} = \frac{\Delta_0}{x_k} + \gamma_s \frac{x}{x_k} \quad (2)$$

Приведенное значение погрешности в начале диапазона (при $x=0$) обозначим через $\Delta_0/x_k=\gamma_n$. Тогда соотношение (2) примет вид

$$\gamma_{np}(x) = \gamma_n + \gamma_s \frac{x}{x_k}.$$

Это соотношение отражает график на рис. 4б.

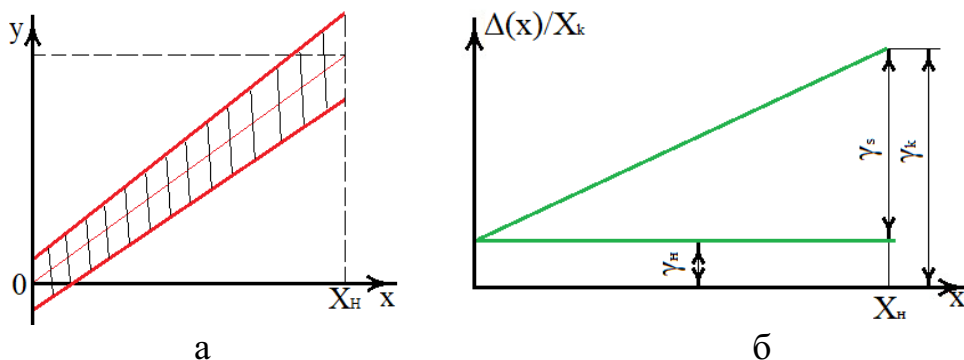


Рисунок 4. Графическое изображение погрешности при наличии аддитивной и мультипликативной составляющих

Таким образом, при наличии у прибора и аддитивной, и мультипликативной составляющих погрешности его приведенная погрешность линейно возрастает от $\gamma_n=\Delta_0/x_k$ в начале диапазона (при $x=0$) до значения $\gamma_k=\gamma_n+\gamma_s$ в конце диапазона (при $x=x_k$).

Относительная погрешность результата измерения, исходя из выражения (1), составляет

$$\gamma(x) = \frac{\Delta(x)}{x} = \frac{\Delta_0}{x} + \gamma_s = \gamma_s + \gamma_n \frac{x_k}{x}, \quad (3)$$

т. е. при $x=x_k$ она равна $\gamma(x)=\gamma_n+\gamma_s=\gamma_k$, а по мере уменьшения x возрастает до бесконечности. Но отличие $\gamma(x)$ от чисто аддитивной погрешности состоит в том, что заметное возрастание $\gamma(x)$ начинается тем позже, чем меньше γ_n по сравнению с γ_s . Для иллюстрации этого явления на рис. 5 изображены кривые для частного случая $\gamma_n+\gamma_s=\gamma_k=2\%=\text{const}$, из которых видно, что возрастание $\gamma(x)$ происходит при уменьшении x вне зависимости от отношения γ_s/γ_n . Из этих кривых также видно, как расширяется рабочий диапазон СИ по мере увеличения отношения γ_s/γ_n , т. е. уменьшения Δ_0 и приближения полосы погрешностей, приведенной на рис. 4, а, к чисто мультипликативной полосе.

Например, если принять заданное значение погрешности γ_s , ограничивающее нижнюю границу рабочего диапазона, $\gamma_s = 4\%$, то при $\gamma_s/\gamma_n=0$ рабочий диапазон будет двукратным (от 50 до 100%). При $\gamma_s/\gamma_n = 3$ он становится уже пятикратным (от 20 до 100%), а при $\gamma_s/\gamma_n=20$ – двадцатикратным (от 5 до 100%). В последнем случае в интервале от 100 до 10% диапазона прибора погрешность результатов измерения почти не изменяется, т. е. большие и малые

значения x измеряются с одной и той же относительной погрешностью.

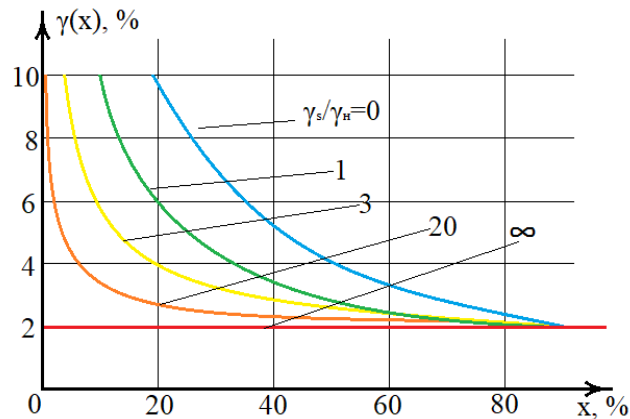


Рисунок 5. Изменение погрешности внутри диапазона измерений

Форму полосы погрешностей, которая изображена на рис. 4а, а следовательно, и вытекающие из этого свойства имеют высокоточные потенциометры постоянного тока, цифровые вольтметры и другие высокоточные приборы. Формальным отличительным признаком для них является то, что их класс точности согласно ГОСТ 8.401 обозначается не одним, а двумя числами, записываемыми через косую черту, т. е. в виде условной дроби γ_k/γ_n , в числителе которой указывается (в процентах) приведенная погрешность γ_k в конце диапазона измерений, а в знаменателе — приведенная погрешность γ_n в нуле диапазона.

Нормирование погрешностей с помощью формул. Кроме перечисленных выше разновидностей нормирования погрешностей средств измерений (путем указания классов точности в виде γ_s , γ_0 , γ_k/γ_n), ГОСТ 8.401 разрешает использовать так называемые специальные формулы нормирования погрешностей. Это необходимо для того, чтобы нормировать погрешности средств измерений, имеющие более сложный вид, чем тот, который показан на предыдущих рисунках.

К числу таких приборов, например, относятся цифровые частотомеры, погрешность которых зависит не только от измеряемой величины x , но и от времени T , отводимого для измерения этой частоты, а также мосты для измерения сопротивлений, отличающиеся тем, что имеют не только нижний (порог чувствительности), но и верхний предел измерения, ограниченный погрешностью. Особенностью этих приборов является то, что их порог чувствительности, в том числе, определяется и неопределенностью контактных сопротивлений, а верхний предел измерений ограничен погрешностью при измерении очень больших сопротивлений из-за приближения измеряемого сопротивления к сопротивлению изоляции между зажимами самого моста. В этом

случае погрешность результатов измерения описывается трехчленной формулой вида

$$\gamma(x) = \frac{\Delta_0}{x} + \gamma_s + \frac{x}{\Delta_\infty}, \quad (4)$$

где Δ_∞ и Δ_0 – верхний и нижний пороги измеряемых сопротивлений, при которых погрешность достигает 100%.

Во всех подобных случаях необходимо внимательно изучать документацию на соответствующий прибор и пользоваться для вычисления погрешности результата измерения приводимыми в ней специальными формулами.

Обозначения классов точности средств измерений производятся согласно ГОСТ 8.401, при этом для указания нормированных значений погрешности чувствительности γ_s , приведенной аддитивной погрешности γ_0 , приведенных погрешностей в начале γ_n и конце γ_k диапазона измерений не могут использоваться произвольные числа. Выраженные в процентах, они могут иметь значения 6–4–2,5–1,5–1,0–0,5–0,2–0,1–0,05–0,02–0,01–0,005–0,002–0,001 и т.д. Значение класса точности прибора маркируется на его шкале. Для того чтобы различить, какая из погрешностей обозначена в качестве класса точности, используются следующие условные обозначения [10].

Если класс точности прибора установлен по значению погрешности чувствительности γ_s , т.е. форма полосы погрешности условно принята чисто мультипликативной, то обозначаемое на шкале значение класса точности обводится кружком. Например, $\textcircled{1}$ обозначает, что $\gamma_s = 1,5\%$. Если же полоса погрешностей принята аддитивной и прибор нормируется приведенной погрешностью нуля γ_0 (таких приборов большинство), то класс точности указывается просто как 1,5. На приборах с резко неравномерной шкалой, например омметрах, класс точности прибора указывается в долях от длины шкалы и обозначается $\surd^1$. Обозначение класса точности в виде, например, 0,02/0,01 указывает, что погрешность прибора нормирована по двучленной формуле с $\gamma_n = 0,01\%$ и $\gamma_k = 0,02\%$.

Таким образом, обозначение класса прибора дает достаточно полную информацию для приближенной оценки погрешностей результатов измерения.

Следует отметить, что хотя ГОСТ 8.401 направлен на то, чтобы нормирование погрешностей СИ производилось единообразно, в измерительной практике такого единообразия пока еще нет, так как используется большое число хороших высокоточных приборов, которые были выпущены еще до введения этого стандарта, закупаются и широко используются приборы иностранного производства, нормированные, естественно, не в соответствии с ГОСТ 8.401, и т.д. Например, погрешность высокоточных потенциометров постоянного тока

нормируется чаще всего двучленной формулой, а класс точности прибора указывается в виде одного числа – его относительной погрешности чувствительности. В этом случае указание класса точности в виде одного числа γ_s не является признаком того, что прибор не имеет аддитивной составляющей погрешности, и потребитель обязан быть внимательным при расчете погрешностей результатов измерения, чтобы не допустить ошибки.

При нормировании погрешностей сложных СИ двучленной формулой (3) ГОСТ 8.401 предусматривает несколько иное ее написание. Это производится в том случае, когда текущее значение относительной погрешности $\gamma(x)$ выражается не через значение аддитивной γ_n и мультипликативной γ_s составляющих предела допускаемых погрешностей, как в формуле (1), а через указываемые в обозначении класса точности приведенные погрешности в начале γ_n и в конце γ_k диапазона измерений. В этом случае, учитывая, что $\gamma_k = \gamma_n + \gamma_s$ соотношение (1) получает вид

$$\gamma(x) = \gamma_k + \gamma_n \left(\frac{X_k}{x} - 1 \right). \quad (5)$$

Практически этим соотношением более удобно пользоваться для вычисления $\gamma(x)$ по известным x , X_k , γ_n и γ_k , чем соотношением (3).

У широкодиапазонных приборов, например мостов для измерения сопротивлений, в их технической документации вместо указания коэффициентов трехчленной формулы (4) часто приводятся просто диапазоны, в которых погрешность результата измерения не превосходит указанного значения. Например, указывается, что относительная погрешность не превосходит:

0,5% в диапазоне от 10^2 до 10^4 Ом;

1% – от 5 до 10^5 Ом;

5% – от 0,5 до 10^6 Ом;

10% – от 0,2 до $2 \cdot 10^6$ Ом;

20% – от 0,1 до $4 \cdot 10^6$ Ом.

Как правило, эти данные достаточно точно соответствуют трехчленной формуле (4). Поэтому по ним можно определить коэффициенты Δ_0 , Δ_∞ и γ_s формулы (4) и использовать ее для аналитического определения $\gamma(x)$ при любом произвольном значении x .

4.4. Расчет оценки инструментальной статической погрешности результата измерения по паспортным данным используемого средства измерений

4.4.1 Вычисление погрешности при различном нормировании класса точности

Результат измерения имеет ценность лишь тогда, когда можно оценить его интервал неопределенности, т. е. степень достоверности. Поэтому, согласно ГОСТ 8.011–72 «Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений», сообщение о любом результате измерений обязательно должно сопровождаться указанием его погрешности.

Погрешность результата прямого однократного измерения зависит от многих факторов, но в первую очередь определяется, естественно, погрешностью используемых средств измерений. Поэтому в первом приближении погрешность результата измерения можно принять равной погрешности, которой в данной точке диапазона измерений характеризуется используемое средство измерений.

Так как погрешности средств измерений изменяются в диапазоне, то вычисление должно производиться по соответствующим формулам. Вычисляться должна как абсолютная, так и относительная погрешности результата измерения, так как первая из них нужна для округления результата и его правильной записи, а вторая – для однозначной сравнительной характеристики его точности. Для разных характеристик нормирования погрешностей СИ эти вычисления производятся по-разному, поэтому рассмотрим три характерных случая.

1. Класс точности прибора указан в виде одного числа γ_s заключенного в кружок. Тогда относительная погрешность результата (в процентах) $\gamma(x) = \gamma_s$, а абсолютная его погрешность $\Delta(x) = \gamma_s x / 100$.

2. Класс точности прибора указан одним числом γ_0 (без кружка). Тогда абсолютная погрешность результата измерения $\Delta(x) = \gamma_0 X_k$, где X_k – предел измерений, на котором оно производилось, а относительная погрешность измерения (в процентах) находится по формуле

$$\gamma(x) = \frac{\Delta(x)}{x} = \gamma_0 \frac{x_k}{x}, \quad (6)$$

т.е. в этом случае при измерении, кроме отсчета измеряемой величины x , обязательно должен быть зафиксирован и предел измерений x_k , иначе впоследствии нельзя будет вычислить погрешность результата.

3. Класс точности прибора указан двумя числами в виде γ_k / γ_n . В этом случае удобнее вычислить относительную погрешность результата по формуле (5), а уже затем найти абсолютную погрешность как $\Delta(x) = \gamma(x)x / 100$.

При использовании этих формул полезно помнить, что в формулы для определения $\gamma(x)$ значения γ_s , γ_0 , γ_n и γ_k подставляются в процентах, поэтому и

относительная погрешность результата измерения получается также в процентах. Однако для вычисления абсолютной погрешности $\Delta(x)$ в единицах x значение $\gamma(x)$ (в процентах) необходимо разделить на 100.

4.4.2 Правила округления значений погрешности и результата измерения

Рассчитывая значения погрешности по формулам (5) и (6), особенно при пользовании калькулятором, значения погрешностей получают с большим числом знаков. Однако исходными данными для расчета являются нормируемые значения погрешности СИ, которые указываются всего с одной или двумя значащими цифрами. Вследствие этого и в окончательном значении рассчитанной погрешности должны быть оставлены только первые одна-две значащие цифры. При этом приходится учитывать следующее. Если полученное число начинается с цифр 1 или 2, то отбрасывание второго знака приводит к очень большой ошибке (до 30–50%), что недопустимо. Если же полученное число начинается, например, с цифры 9, то сохранение второго знака, т. е. указание погрешности, например, 0,94 вместо 0,9, является дезинформацией, так как исходные данные не обеспечивают такой точности.

Исходя из этого, на практике установилось такое правило: если полученное число начинается с цифры, равной или большей $\sqrt{10} \approx 3$, то в нем сохраняется лишь один знак; если же оно начинается с цифр, меньших 3, т. е. с цифр 1 и 2, то в нем сохраняют два знака. В соответствии с этим правилом установлены и нормируемые значения погрешностей средств измерений: в числах 1,5 и 2,5% указываются два знака, но в числах 0,5; 4; 6% указывается лишь один знак.

В итоге можно сформулировать три правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного экспериментального результата измерения.

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной, если первая есть 3 и более.
2. Результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности.
3. Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Пример. На вольтметре класса точности 2,5 с пределом измерений 300 В был получен отсчет измеряемого напряжения $x = 267,5$ В.

Расчет погрешности удобнее вести в следующем порядке. Необходимо вначале найти абсолютную погрешность, а затем относительную. Абсолютная погрешность $\Delta(x) = \gamma_0 X_k / 100$; при $\gamma_0 = 2,5\%$ и $X_k = 300$ В это дает $\Delta(x) = \frac{2,5 \cdot 300}{100} = 7,5$

$V \approx 8$ В; относительная погрешность $\gamma(x) = \frac{\Delta_0}{x} 100 = \frac{7,5}{267,5} 100 = 2,81\% \approx 2,8\%$.

Так как первая значащая цифра значения абсолютной погрешности (7,5 В)

– больше 3, то это значение должно быть округлено по обычным правилам округления до 8 В, но в значении относительной погрешности (2,81%) первая значащая цифра меньше 3, поэтому здесь должны быть сохранены в ответе два десятичных разряда и указано $\gamma(x) = 2,8\%$. Полученное значение $x=267,5$ В должно быть округлено до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности, т. е. до целых единиц вольт.

Таким образом, в окончательном ответе должно быть сообщено следующее. Измерение произведено с относительной погрешностью $\gamma(x)=2,8\%$. Измеренное напряжение $x=(268\pm 8)$ В или $x=268$ В ± 8 В. При этом более наглядно указать пределы интервала неопределенности измеренной величины в виде $x=260\text{--}276$ В или 260 В $<x<276$ В.

Наряду с изложенными правилами округления значений погрешностей результатов измерения иногда применяются и другие, некоторые из них изложены в книге: Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978.

Выводы

Анализ и обобщение физических особенностей появления погрешностей разного рода позволили их классифицировать, что привело к появлению основных терминов, необходимых для понимания природы возникновения и методов расчета основных погрешностей. Оценка погрешности измерений производится исключительно с использованием этих терминов.

Необходимость в оценке точности стандартизованных приборов, с помощью которых производят прямые измерения физических величин, привела к появлению классов точности приборов. Класс точности дает однозначное понимание погрешности прямых измерений.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение аддитивной и мультипликативной погрешностям.
2. Как изменяется абсолютное значение погрешности внутри диапазона измерений?
3. Что выражают обозначения класса точности прибора в кружке и над галкой?
4. Какова погрешность прибора, если класс точности указан одним числом?

*Измерить все, что поддается измерению, а
что не поддается - сделать измеряемым
Галилео Галилей*

5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

5.1 Процедуры передачи размера физической величины. Эталоны, поверочные схемы

Передача размера физической величины непосредственно связана с термином **прослеживаемость**. РМГ 29 дают определение метрологической прослеживаемости как свойства результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений [3]. Цепь метрологической прослеживаемости выражается в последовательности эталонов и калибровок (поверок), которые используются для соотнесения результата измерения с основой для сравнения [3]. Очевидно, что основой для сравнения является эталон, который определяется как средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений [2]. Эталон должен отвечать трем основным требованиям:

- неизменность**, т.е. способность удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени;
- воспроизводимость**, т.е. воспроизведение единицы с наименьшей погрешностью для данного уровня развития измерительной техники;
- сличаемость**, т.е. способность не претерпевать изменений и не вносить каких-либо искажений при проведении сличений.

В Федеральном законе «Об обеспечении единства измерений» [14] введено понятие **государственный эталон единицы величины**. Он определен как «эталон единицы величины, находящийся в федеральной собственности». В Статье 7, п.1 указано, что «... государственные эталоны единиц величин образуют эталонную базу Российской Федерации». Среди государственных эталонов единиц величин выделяются государственные первичные эталоны единиц величин – государственные эталоны единиц величин, обеспечивающие воспроизведение, хранение и передачу единиц величин с наивысшей в Российской Федерации точностью, утверждаемые в этом качестве в установленном порядке Росстандартом и применяемые в качестве исходных на территории Российской Федерации [7]. Государственные первичные эталоны единиц величин не подлежат приватизации. Государственные первичные эталоны единиц величин содержатся и применяются для сличений в государственных научных метрологических институтах. Они подлежат сличению с эталонами

единиц величин Международного бюро мер и весов и национальными эталонами единиц величин иностранных государств. В Российской Федерации должны применяться эталоны единиц величин, прослеживаемые к государственным первичным эталонам соответствующих единиц величин. В случае отсутствия соответствующих государственных первичных эталонов единиц величин должна быть обеспечена прослеживаемость средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, к национальным эталонам единиц величин иностранных государств (Ст. 7, п. 7). Прослеживаемость от государственных эталонов выполняется в соответствии с принятой поверочной схемой.

Поверочная схема – это иерархическая структура, устанавливающая соподчинение эталонов, участвующих в передаче единицы или шкалы измерений от исходного эталона средствам измерений (с указанием методов и погрешностей при передаче), утверждаемая в установленном порядке в виде нормативного документа. Основные требования к поверочной схеме выражены в МИ 2148-91 [15]. Поверочные схемы в зависимости от области распространения подразделяются на следующие виды:

- межгосударственные поверочные схемы;
- государственные поверочные схемы;
- локальные поверочные схемы.

Межгосударственные поверочные схемы (для стран СНГ) утверждаются Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии, сертификации. Государственная поверочная схема распространяется на все средства измерения данной физической величины, применяемые в стране. Локальная поверочная схема распространяется на все средства измерений, подлежащие поверке в данном предприятии, ведомстве, республике, регионе и др. В соответствии со своей областью распространения локальная поверочная схема может называться поверочной схемой предприятия, ведомственной, республиканской, региональной и др. Локальные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам для средств измерений тех же физических величин. они должны конкретизировать требования государственных поверочных схем применительно к своей области распространения.

Методы поверки, указываемые на поверочной схеме, должны отражать специфику поверки данного вида средств измерений. Они соответствуют одному из следующих общих методов:

- непосредственному (без компараторов) сличению поверяемого средства измерений с образцовым средством измерений того же вида;
- сличению поверяемого средства измерений с образцовым средством измерений того же вида при помощи компаратора;
- прямому измерению поверяемым измерительным прибором величины, воспроизведенной образцовой мерой;

- прямому измерению образцовым измерительным прибором величины, воспроизведенной подвергаемой поверке мерой;
- косвенным измерениям величины, воспроизведенной мерой или измеряемой прибором, подвергаемым поверке;
- независимой поверке, т.е. поверке средств измерений относительных (безразмерных) величин, не требующих передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений, проградуированных в единицах размерных величин.

Таким образом, процедура сличения начинается от международного эталона, который признан всеми государствами, подписавшими международное соглашение, и предназначен для всего мира. Международный эталон часто называют первичным эталоном. С этим эталоном сличается государственный национальный эталон, признанный национальными органами власти для использования в государстве или экономике в качестве исходного для страны. Этот эталон является первичным для страны. Первичный эталон сличается со вторичным эталоном. Вторичные эталоны обычно хранятся в метрологических институтах и региональных центрах поверки. С ними сличаются рабочие эталоны, т.е. приборы, предназначенные для передачи размера единицы образцовым средствам измерения высшей точности и в отдельных случаях – наиболее точным рабочим средствам измерений. Рабочие эталоны хранятся в метрологических службах промышленных предприятий.

Рабочие эталоны предназначены для поверки и калибровки рабочих приборов. При необходимости их подразделяют на разряды: 1-й, 2-й, 3-й и т. д. В этом случае рабочие эталоны 1-го разряда также передают размер единицы рабочим эталонам 2-го разряда, рабочие эталоны 2-го разряда – рабочим эталонам 3-го разряда и т. д. Средства измерений промышленных предприятий поверяются с помощью рабочих эталонов. В отдельных случаях рабочие эталоны участвуют в производственном процессе, однако их стоимость велика, и подобное применение должно быть экономически обоснованным.

Отметим, что межгосударственные и национальные эталоны представляют собой специально разработанные установки, вторичные эталоны разрабатываются специально лишь в отдельных случаях, а рабочие эталоны представляют собой серийно выпускаемый прибор высокой точности. Рабочий эталон может состоять из нескольких приборов, в число которых входят мера физической величины и компаратор. Часто рабочие эталоны используются и для прямого сличения и называются калибраторами. Стоимость таких приборов значительна.

5.2 Поверка и калибровка средств измерений

Как указано в Федеральном законе «Об обеспечении единства измерений», средства измерений, применяемые в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений до ввода в эксплуатацию, а также после ремонта подлежат первичной поверке, а в процессе эксплуатации – периодической поверке. Калибровка и поверка измерительных приборов являются самыми распространенными процедурами, без которых не может обойтись ни одно промышленное предприятие. Отвечают за проведение этих процедур метрологические службы предприятий. Поверку в обязательном порядке проходят все средства измерений, участвующие в предъявлении продукции заказчику, а также службе технического контроля изготовителя при проверке характеристик продукции, нормируемых в паспорте, технических условиях или других документах, отражающих характеристики изделия.

Поверки бывают нескольких видов [3].

Первичная поверка средств измерений – это поверка, выполняемая при выпуске средства измерений из производства или после ремонта, а также при ввозе средства измерений из-за границы.

Периодическая поверка средств измерений – это поверка средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные интервалы времени между поверками (межповерочные интервалы). При этом межповерочные интервалы устанавливаются нормативными документами по поверке в зависимости от стабильности того или иного средства измерений и могут колебаться от нескольких месяцев до нескольких лет.

Кроме того, приборы могут подвергаться внеочередной, инспекционной поверке, выборочной поверке, определения которых также даются в РМГ 29. Проверку проходят только те приборы, которые имеются в госреестре средств измерений в соответствии с описанием типа прибора. По результатам поверки выдается свидетельство, в котором констатируется тот факт, что погрешность измерительного средства не выходит за допустимые пределы. При этом в свидетельстве указывается, что прибор годен к эксплуатации, и срок очередной поверки. В случае, если погрешность превысила нормированное значение, прибор бракуется и отправляется на ремонт или списание. Процедура поверки входит в сферу государственного регулирования, а метрологические службы предприятий имеют право выполнять поверку только в случае их аккредитации на право поверки, которую производит Росаккредитация.

Процедура калибровки, в отличие от поверки, не входит в сферу государственного регулирования. При выполнении калибровки формируется протокол, в котором отражены характеристики измерительного средства при задании контрольных воздействий в разных точках диапазона, а по ее

результатам выписывается сертификат. В сертификате отражается калибровочная характеристика, при этом заключение о годности измерительного средства не делается. Калибруемые измерительные средства также имеют межкалибровочный интервал. Их используют в технологических и исследовательских целях, но не при сдаче продукции. Следует отметить, что при проведении исследовательских испытаний иногда предпочтительнее иметь сертификат калибровки с калибровочной характеристикой, а не свидетельство о поверке, так как в сертификате содержится информация о систематическом изменении характеристики измерительного средства. Учет систематической погрешности прибора, прошедшего калибровку, позволяет выполнить измерительный эксперимент более точно. В связи с этой особенностью иногда производят одновременно процедуры и поверки и калибровки.

Несмотря на то, что калибровка не входит в сферу государственного регулирования, в некоторых случаях предприятия, не имеющие права поверки, аккредитуются на право калибровки. Эта процедура также производится Росаккредитацией и бывает необходимой в соответствии с требованиями системы менеджмента качества предприятий оборонно-промышленного комплекса, Росатома, РЖД, Роскосмоса и др. Требования к аккредитации на право калибровки существенно ниже, чем на право поверки. Учитывая экономические затраты на получение и поддержание аккредитации на право поверки или калибровки, включающие закупку и поверку эталонов, периодическое обучение кадрового состава, затраты на обеспечение системы менеджмента качества поверки или калибровки по ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009, и сравнивая эти затраты с ценой поверки приборов в специализированных организациях, каждое из промышленных предприятий строит свою техническую политику индивидуально.

5.3 Процедуры измерительного эксперимента

5.3.1. Особенности измерительного эксперимента

Практические потребности в измерительном эксперименте выявляются на всех стадиях жизненного цикла технических средств. Измерения с разной целью производятся на этапах исследований и разработки изделий, а также при их эксплуатации и поддержании в должном состоянии, по их результатам принимается решение об утилизации изделий. Измерительный эксперимент проводится и с целью обеспечения качества работы всех без исключения отраслей, начиная от техники и заканчивая биологией.

Рассмотрим организацию и особенности проведения измерений как определенной последовательности операций или этапов. Такой измерительный эксперимент проводится при сложных научных исследованиях, однако при проведении других работ этапы эксперимента останутся такими же, упростятся лишь их содержание.

В настоящее время принято выделять четыре основных этапа измерения:

1. Анализ и постановка измерительной задачи, включая построение математической модели измерения.
2. Подготовка и планирование измерения, в том числе выбор и размещение средств измерений.
3. Выполнение экспериментальных операций с использованием средств измерений (измерительный эксперимент).
4. Математическая обработка экспериментальных данных, включая оценивание погрешностей измерений и приведение результата измерения к установленной форме представления.

Современные измерения весьма многообразны и существенно различаются между собой по трудоемкости и видам выполняемых операций, по соотношению и взаимной значимости этапов. Однако для всех измерений центральной, наиболее существенной частью является измерительный эксперимент. Остальные этапы измерения кажутся менее значимыми, тем более, что во многих простых (массовых) измерениях некоторые из них выполняются в сокращенном виде. Тем не менее, все этапы измерения существенны, поскольку лишь правильное и своевременное их выполнение дает возможность эффективно выполнить эксперимент и получить результат измерения с известной точностью. В частности, во многих прецизионных измерениях метрологического назначения (например, при воспроизведении единиц ФВ или передаче размеров единиц на верхних ступенях поверочных схем), а также при измерениях в научных исследованиях (например, при определении физических констант) приведенная схема реализуется полностью; в некоторых случаях даже может потребоваться ее расширение.

Следует отметить, что для эффективного выполнения измерения важно не только полное и правильное выполнение каждого этапа, но и его своевременная реализация. Наиболее распространенным методологическим недостатком в измерительной практике является то, что нередко экспериментатор откладывает решение части вопросов, связанных с постановочным этапом или планированием измерения, на заключительный этап обработки данных. К сожалению, это иногда приводит к снижению эффективности измерения, то есть, затратив значительное время и усилия на проведение эксперимента, экспериментатор получит результат измерения с меньшей точностью, чем можно было бы достичь при тех же затратах, но при надлежащей подготовке эксперимента.

При структурном исследовании измерения, прежде всего, выделяют основные операции, выполняемые на перечисленных этапах измерения, и анализируют их взаимосвязи. Такие исследования необходимы для эффективного выполнения измерения в целом и отдельных его этапов. Далее кратко рассмотрим содержание основных этапов измерения.

5.3.2 Постановка измерительной задачи

Постановочный этап, в общем случае, осуществляется в следующей последовательности.

1.1. Анализ цели измерения, априорной информации об условиях измерения и исследуемой величине, а также требуемой точности измерения.

1.2. Уточнение модели объекта исследований (ОИ) и модели физической величины (если она переменна).

1.3. Определение измеряемой величины в рамках построенной модели величины.

1.4. Постановка (формализация) измерительной задачи на основе принятой модели.

1.5. Выбор непосредственно измеряемых аргументов.

1.6. Формирование уравнений измерений – зависимостей между измеряемой величиной и указанными аргументами.

Наиболее важным вопросом, особенно при постановке сложных измерений, является формирование *модели объекта исследований*, которая отражала бы существенные для данного измерения свойства реального объекта. Такая модель первоначально формируется на основе априорных данных и цели измерения на начальном этапе измерения, однако при необходимости она может уточняться и изменяться в зависимости от результатов выполнения последующих этапов. Иногда формирование сложной модели проводится в несколько этапов: сначала выбирают общую структуру модели и начальные значения ее параметров, а затем параметры уточняют (оценивают) на основе экспериментальных данных.

Измеряемая величина определяется с помощью принятой модели объекта как постоянный параметр или характеристика объекта, отражающая выделенное его свойство. Выбор измеряемой величины не всегда однозначен (в частности, при исследовании переменных величин); он также может уточняться в процессе исследований.

Наконец, в заключение первого этапа измерений формируются *уравнения измерений*. В соответствии с видом уравнений измерения разбиваются на упомянутые ранее основные категории, а именно: прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения (введенные в разделе 2).

5.3.3 Подготовка и планирование измерения

Данный подготовительный этап в общем случае содержит две основных группы операций, связанных, с одной стороны, с выбором методов и средств измерений, и с другой – с выбором параметров измерительного эксперимента. В общем случае он выполняется в следующей последовательности.

2.1. Выбор методов измерений.

2.2. Выбор возможных типов средств измерений (СИ) и анализ их метрологических характеристик (МХ).

2.3. Предварительный выбор алгоритма обработки данных.

2.4. Априорное оценивание погрешностей результатов измерений на основе МХ СИ и других априорных данных.

2.5. Выбор СИ на основе сопоставления априорных оценок и требований к погрешностям результатов измерений.

2.6. Выбор конкретных параметров измерительного эксперимента, включая точки в пространстве и моменты времени, где и когда выполняются наблюдения, а также число наблюдений для каждого аргумента.

2.7. Подготовка выбранных СИ к выполнению экспериментальных операций.

2.8. Обеспечение требуемых условий измерений или создание возможности их контроля.

Перечисленные операции весьма разнородны и могут выполняться в разном объеме в зависимости от особенностей конкретной задачи. На некоторых этапах удастся формализовать задачу и использовать соответствующие математические методы; это относится, прежде всего, к выбору параметров измерительного эксперимента, где могут использоваться методы теории планирования эксперимента. Однако во многих случаях формализовать задачу не удастся, и тогда решение приходится принимать на основе практического опыта и неформальных соображений.

Отметим, что для массовых (технических) измерений обычно планирование выполняется при разработке методики выполнения измерений (МВИ). Таким образом, для этой группы измерений этап планирования выполняется заранее и в явном виде в измерительную процедуру не входит; тем не менее, это не снижает его значимость как этапа, определяющего эффективность измерения в целом.

Описанные выше подготовительные этапы процедуры измерения определяют эффективность выполнения измерения в целом. Иногда к ним приходится возвращаться в дальнейшем, после выполнения следующих этапов измерений. Например, если при обработке данных будет получен результат измерения, не удовлетворяющий поставленным требованиям, то необходимо уточнить план эксперимента и, возможно, даже пересмотреть исходную модель объекта исследований. Это важно не только при проведении сложных метрологических исследований высокой точности, но и во многих других случаях, когда априорных данных оказывается недостаточно для построения адекватной модели объекта.

5.3.4 Измерительный эксперимент

Измерительный эксперимент представляет собой измерение в узком смысле. В общем случае трудно выделить четкую последовательность его выполнения, поскольку объекты и средства измерений, а также процессы их взаимодействия весьма разнообразны. Тем не менее, можно выделить следующие основные операции, выполняемые на этом этапе.

3.1. Взаимодействие средств измерений с объектом исследований.

3.2. Преобразования сигналов измерительной информации, в том числе первичное преобразование, промежуточные преобразования.

3.3. Воспроизведение измерительного сигнала с заданным размером информативного параметра.

3.4. Сравнение сигналов и получение (регистрация) результата наблюдения.

Для исследования экспериментального этапа измерения в метрологии используется понятие **метод измерений** (см. раздел 4). Ввиду сложности и разнообразия экспериментов это понятие трактуется в настоящее время неоднозначно. Например, в узком смысле метод измерения понимается как конкретное правило (алгоритм) сравнения измеряемой величины с единицей. В широком смысле метод измерения определяется как совокупность приемов использования средств измерений.

Измерительный эксперимент как центральный этап измерения естественным образом распадается на ряд однородных частей, каждая из которых завершается получением одного значения измеряемой величины (результата наблюдения). Для их выделения используется традиционный термин "наблюдение при измерении" или просто "наблюдение". Это понятие необходимо для анализа процедуры измерения и, особенно, для этапа обработки данных (результатов наблюдений).

5.3.5 Обработка данных при измерении

Обработка данных при измерении представляет собой заключительный этап измерительной процедуры, на котором выполняют математические операции над экспериментальными данными, полученными на предыдущем этапе, с целью формирования искомого результата измерения и оценивания показателей его погрешности. Содержание и объем обработки данных могут быть различны, в зависимости от категории и вида измерения, объема и свойств экспериментальных данных, требований к точности измерений. Однако логика решения измерительной задачи в общем случае обуславливает следующую последовательность обработки данных.

4.1. Формализация и предварительный анализ исходной информации (априорной и полученной на предыдущих этапах измерения), включая уравнения измерений, метрологические характеристики используемых СИ, результаты

наблюдений, полученные в измерительном эксперименте, и сведения об их погрешностях, а также результаты дополнительных измерений.

4.2. Вычисление возможных поправок на систематические погрешности и внесение их в результаты наблюдений.

4.3. Формулирование и анализ математической задачи обработки данных; при необходимости – уточнение модели измерения.

4.4. Выбор или построение алгоритма обработки данных (на основе известных свойств возможных алгоритмов, априорной информации и предварительного анализа данных).

4.5. Вычисление результата измерения и показателей его погрешности согласно принятому алгоритму.

4.6. Анализ и интерпретация полученных результатов, в том числе:

а) проверка выполнения исходных требований к результатам измерений (по диапазонам, точности и т.д.);

б) проверка согласия результатов с принятой моделью объекта исследований.

При необходимости после этого возвращаются к предыдущим операциям обработки (например, уточняют алгоритм обработки данных) или даже к первым этапам измерения (уточняют модель объекта, план измерения, выполняют дополнительные наблюдения и т.д.)

5.3.6 Запись результата измерения и показателей погрешности в соответствии с установленной формой представления

Из перечисленного выше наиболее существенным действием является вычисление результата измерения и показателей его погрешности согласно определенному алгоритму; это и является обработкой данных в узком смысле. Алгоритм обработки данных (как конкретное правило преобразования исходных данных в конечный результат) во многих случаях бывает задан. Однако в сложных измерительных задачах часто алгоритм заранее не известен; тогда необходимо предусмотреть выбор рационального алгоритма из нескольких возможных или даже построение нового алгоритма для данной задачи. Для многих измерений необходимы также предварительный анализ имеющейся информации и введение возможных поправок на систематические погрешности. Кроме того, во многих случаях важен заключительный анализ полученных результатов обработки и их содержательная интерпретация. Хотя некоторые из перечисленных пунктов в конкретных задачах могут отсутствовать, но их необходимо учитывать; нередко их выполняют заранее – при разработке МВИ или методик обработки данных.

Запись полученного результата измерения и оценок его погрешностей не является трудоемкой операцией. Однако она важна для измерительных задач, поскольку обеспечивает возможность дальнейшего использования или

сопоставления полученных результатов измерений, и следовательно - направлена на обеспечение единства измерений.

Выводы

Задачей метрологических измерительных процедур является получение значения измеряемой величины с известной точностью. В связи с особенностью законодательной базы России приборы проходят поверку или калибровку, выполняемые путем сличения их результатов измерений с эталонными значениями. Эти процедуры позволяют оценить точность средств измерений. Измерительный эксперимент следует планировать и выполнять в соответствии с его целью. Обработка результатов должна позволять однозначно определять погрешность измерения.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение измерительному эксперименту.
2. Чем отличается поверка от калибровки?
3. В чем особенности проведения измерительного эксперимента?

*Метод ... есть не внешняя форма, а душа и
понятие содержания ...
Георг Вильгельм Фридрих Гегель*

6. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1 Назначение и общие требования

В соответствии с Законом Российской Федерации ФЗ №102 «Об обеспечении единства измерений» (статья 9) [14], «...измерения должны осуществляться в соответствии с аттестованными в установленном порядке методиками. Порядок разработки и аттестации методик измерений определяется Госстандартом России».

Методика (выполнения) измерений в соответствии с РМГ 29-2013 определяется как «установленная логическая последовательность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений в соответствии с принятым методом измерений» [3]. В ФЗ №102 [13] дается иное определение: «**Методика (метод) измерений**: Совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности».

Таким образом, методика измерений описывает измерительную процедуру. При этом в ней прописаны показатели точности измерений. В соответствии с требованиями стандартов ИСО серии 9000 все процедуры должны быть документированы. Следовательно, измерительные процедуры, прописанные в методике, должны быть документально оформлены.

Разработки методики (выполнения) измерений можно избежать в ситуации, при которой результатом измерения является показание СИ, используемого в полном соответствии с его инструкцией по эксплуатации без каких-либо дополнений, т.е. при прямых измерениях.

Методику (выполнения) измерений разрабатывают и документируют, если измерительную задачу необходимо решать в одной из следующих ситуаций:

- измерения выполняют с применением СИ, но в инструкции по эксплуатации этого СИ не приведены ни показатели точности измерений, ни алгоритмы их вычисления по метрологическим характеристикам СИ;
- измерения выполняют по методам, погрешности результатов измерений которых определяются не только погрешностью СИ, но и другими составляющими погрешностей;
- измерения выполняют по методам, для которых требуются новые правила получения результатов измерений, алгоритм вычисления результатов измерений и показателей точности измерений;

- измерения выполняют по методам, когда искомое значение величины определяют по известной зависимости между этой величиной и величинами подвергаемым прямым измерениям (косвенные измерения);
- измерения выполняют при количественном химическом анализе (КХА).

В соответствии со статьей 5 ФЗ №102 [14] методики (выполнения) измерений подлежат обязательной аттестации, если они используются в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Общие требования к разработке, регламентированию, экспертизе, аттестации, стандартизации методик (выполнения) измерений и к метрологическому надзору за ними содержатся в ГОСТ Р 8.563-2009 [16].

Очевидно, что «методики измерений разрабатывают и применяют с целью обеспечить выполнение измерений с требуемой точностью» [16].

«Разработку методик измерений осуществляют на основе исходных данных, которые могут быть приведены в техническом задании, технических условиях и других документах» [16]. К исходным данным относится следующее:

- требования к области применения методики (входит ли она в технические регламенты, национальные стандарты и т.д.);
- наименование измеряемой величины в единицах величин, допущенных к применению в Российской Федерации;
- требования к показателям точности измерений;
- требования к условиям выполнения измерений;
- характеристики объекта измерений, если они могут влиять на точность измерений (выходное сопротивление, жесткость в месте контакта с датчиком, состав пробы и т.п.).

«Требования к точности измерений приводят путем задания показателей точности и ссылки на документы, в которых эти значения установлены» [16].

«Методики измерений должны обеспечивать требуемую точность оценки показателей, подлежащих допусковому контролю» [16].

Таким образом, требования к характеристикам погрешности измерений и (или) характеристикам составляющих погрешности измерений (систематической и случайной составляющим) являются основными исходными требованиями для разработки методики (выполнения) измерений. Часто на практике для установления требований к характеристикам погрешности измерений используют отношение погрешности измерений к допуску на контролируемый параметр. В этом случае для случайной погрешности, исходя из принципа 3σ , погрешность должна быть в три раза меньше допуска.

«Условия измерений задают в виде номинальных значений с допускаемыми отклонениями и (или) границ диапазонов возможных значений влияющих величин. При необходимости указывают предельные скорости изменений или другие характеристики влияющих величин, а также ограничения на продолжительность измерений, число параллельных определений и т.п.

данные. Если измерения предполагают выполнять с использованием измерительных систем, для которых средства измерений, входящие в состав измерительных каналов, пространственно удалены друг от друга, то условия измерений указывают для мест расположения всех средств измерений, входящих в измерительную систему» [16].

Кроме того, для разработки МВИ могут потребоваться и другие сведения, например, о наличии СИ, в том числе утвержденных типов, и др.

6.2 Процедура разработки и состав методик (выполнения) измерений

Разработка МВИ, как правило, включает следующие этапы [16]:

- формулирование измерительной задачи и описание измеряемой величины;
- предварительный отбор возможных методов решения измерительной задачи;
- выбор метода и средств измерений (в том числе стандартных образцов), вспомогательных устройств, материалов и реактивов;
- установление последовательности и содержания операций при подготовке и выполнении измерений, включая требования по обеспечению безопасности труда и экологической безопасности и требования к квалификации операторов;
- организацию и проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке показателей точности разработанной методики измерений;
- экспериментальное опробование методик измерений; анализ соответствия показателей точности исходным требованиям;
- обработку промежуточных результатов измерений и вычисление окончательных результатов, полученных с помощью данной методики измерений;
- разработку процедур и установление нормативов контроля точности получаемых результатов измерений;
- разработку проекта документа на методику измерений;
- аттестацию методик измерений;
- утверждение и регистрацию документа на методику измерений, оформление свидетельства об аттестации;
- передачу сведений об аттестованных методиках измерений в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений».

Методику (выполнения) измерений в зависимости от ее сложности, назначения и области применения излагают в:

- отдельном документе (стандарте, инструкции, рекомендации и т. п.);
- разделе или части документа (разделе стандарта, технических условий, конструкторского или технологического документа и т. п.).

В документах (разделах, частях документов), регламентирующих МВИ, в общем случае указывают:

- наименование методики;

- назначение методики;
- условия выполнения измерений;
- требования к погрешности измерений или (и) приписанные характеристики погрешности измерений;
- метод (методы) измерений;
- требования к средствам измерений (в том числе к стандартным образцам, аттестованным смесям), вспомогательным устройствам, материалам, растворам или указывают типы средств измерений, их характеристики и обозначения документов, где приводятся требования к средствам измерений (ГОСТ, ТУ, и др. документы);
- операции при подготовке к выполнению измерений;
- операции при выполнении измерений;
- операции обработки и вычислений результатов измерений;
- нормативы, процедуру и периодичность контроля погрешности результатов выполняемых измерений;
- требования к оформлению результатов измерений;
- требования к квалификации оператора;
- требования к обеспечению безопасности выполняемых работ;
- требования к обеспечению экологической безопасности;
- другие требования к операции (при необходимости).

«В документах на методики измерений, в которых предусмотрено использование конкретных экземпляров средств измерений и других технических средств, дополнительно указывают заводские (инвентарные и т.п.) номера экземпляров средств измерений и других технических средств. Кроме того, в них могут быть даны ссылки на официально опубликованные документы, содержащие требования или сведения, необходимые для реализации методики» [16].

Рекомендации по построению и изложению отдельных документов на МВИ приведены в приложении Б [16].

6.3 Аттестация методик (выполнения) измерений

Аттестация методик (выполнения) измерений есть процедура установления и подтверждения соответствия разработанной методики (выполнения) измерений предъявляемым к ней метрологическим требованиям. Основная цель аттестации методики – подтверждение возможности выполнения измерений в соответствии с процедурой, регламентированной в документе на эту методику, с характеристиками погрешности (неопределенностью) измерений, не превышающими указанных в документе на методику (выполнения) измерений.

В соответствии с [16], «критериями аттестации методик измерений являются:

- полнота изложения требований и операций в документе на методики измерений;
- наличие и обоснованность показателей точности;
- соответствие требованиям нормативных правовых документов в области обеспечения единства измерений.

Аттестацию МВИ, используемых в сферах распространения Государственного метрологического контроля и надзора, осуществляют:

- государственные научные метрологические центры;
- органы государственной метрологической службы;
- метрологические службы юридических лиц, аккредитованные на право проведения аттестации МВИ.

МВИ, используемые вне сферы государственного метрологического контроля и надзора, аттестуются в порядке, установленном в ведомстве и на предприятии.

Аттестацию МВИ осуществляют на основе результатов метрологической экспертизы материалов разработки МВИ и документа (раздела, части документа), регламентирующего МВИ и (или) теоретического и (или) экспериментального исследования МВИ.

Способ аттестации определяется сложностью МВИ и опытом аттестации аналогичных МВИ.

На аттестацию МВИ представляют [16]:

- исходные данные на разработку методик измерений;
- проект документа, регламентирующий методику измерений;
- программу и результаты оценивания показателей точности методики, включая материалы теоретических и экспериментальных исследований методики измерений.

При положительных результатах аттестации [16]:

- оформляют заключение о соответствии методики измерений установленным метрологическим требованиям с приложением результатов теоретических и экспериментальных исследований;
- оформляют свидетельство об аттестации;
- утверждают документ, регламентирующий методику измерений.

6.4 Стандартизация методик. Метрологический надзор за методиками

Наиболее важные аттестованные методики включаются в национальные стандарты.

«В стандарте на методы контроля (испытаний, определений, измерений, анализа) одного и того же показателя могут быть предусмотрены две или более альтернативные методики измерений, при этом одна из них должна быть определена разработчиком стандарта в качестве арбитражной. В данном случае, в целях подтверждения возможности использования для определения этого

показателя нескольких альтернативных методик измерений, в ходе разработки стандарта должны быть выполнены процедуры оценивания и сопоставления показателей точности этих методик измерений. Для них должны быть установлены нормы допускаемых смещений (систематических отклонений) результатов измерений контролируемого показателя, полученных по каждой из альтернативных методик измерений, от результатов измерений этого же показателя по арбитражной методике» [16].

Стандартные методики измерений имеют аббревиатуру «МИ». Они обязательны к выполнению!

Лаборатории, использующие аттестованные методики измерений, обязаны осуществлять постоянный контроль качества измерений в соответствии с процедурами, изложенными в документах на данную методику измерений.

Метрологические службы юридических лиц и индивидуальные предприниматели осуществляют метрологический надзор за наличием и соблюдением аттестованных методик измерений, применяемых при реализации своей деятельности.

Государственный метрологический надзор осуществляется за наличием и соблюдением аттестованных методик измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Выводы

Разработка методики измерений является неотъемлемой частью измерительной процедуры. Методики разрабатываются во многих случаях и служат целью уточнения погрешности выполняемых измерений. Существуют стандартизованные и нестандартизованные методики. Стандартизованные описаны в регламентирующих документах, нестандартизованные разрабатываются специально для выполнения измерительной процедуры и подлежат аттестации.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение методике измерений.
2. Из чего состоит методика измерений?
3. Какие виды методик измерений вы знаете?

*Знание - главный инструмент управления
Билл Гейтс*

7. ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАБОТ ПО МЕТРОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

7.1 Закон о метрологии и его реализация

Обеспечение качества метрологических работ непосредственно связано с государственной политикой в области качества выпускаемой продукции, а также установлено требованиями стандартов качества серии ISO 9000.

В статье 3 ФЗ №102 «Об обеспечении единства измерений» [14] указано: «Законодательство Российской Федерации об обеспечении единства измерений основывается на Конституции Российской Федерации». В статье 11 этого закона утверждается, что «...государственное регулирование в области обеспечения единства измерений осуществляется в следующих формах:

- 1) утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений;
- 2) поверка средств измерений;
- 3) метрологическая экспертиза;
- 4) федеральный государственный метрологический надзор
(в ред. Федерального закона от 18.07.2011 N 242-ФЗ);
- 5) аттестация методик (методов) измерений;
- 6) аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений».

В соответствии с законом «**тип стандартных образцов или тип средств измерений**», применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежит обязательному утверждению. При утверждении типа средств измерений устанавливаются показатели точности, интервал между поверками средств измерений, а также методика поверки данного типа средств измерений» [14]. Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа проводятся юридическими лицами, аккредитованными на этот вид деятельности. «Сведения об утвержденных типах стандартных образцов и типах средств измерений вносятся в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений» [14]. Для удобства пользования этой информацией создан госреестр средств измерений, который находится в открытом доступе и регулярно обновляется. В п. 8 ст 12 закона сказано, что «...юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие разработку, выпуск из производства, ввоз на территорию Российской Федерации, продажу и использование на территории Российской Федерации не предназначенных для применения в сфере государственного регулирования

обеспечения единства измерений стандартных образцов и средств измерений, могут в добровольном порядке представлять их на утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений».

Таким образом, на основании требований закона, в Российской Федерации сложилась практика, при которой производители средств измерений или дистрибьютеры, поставляющие приборы на отечественный рынок, должны по каждому из приборов, выводимых на рынок, провести процедуру утверждения типа стандартных образцов или типа средства измерения. Порядок этой процедуры предложен в правилах, утвержденных приказом Минпромторга [17].

Для выполнения этой процедуры подается соответствующая заявка в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Проводятся испытания типа прибора в Государственных центрах испытаний, аккредитованных на право испытаний стандартных образцов и средств измерений конкретного вида, которые создаются на основе Государственных предприятий. Далее рассматривается вопрос по результатам проведенных испытаний. По существу, эта процедура направлена на подтверждение заявленных изготовителем или дистрибьютером характеристик конкретного стандартного образца или средства измерения, а также удостоверяет факт того, что в государстве обеспечена прослеживаемость необходимого вида измерений с нужной точностью, имеются необходимые эталоны, методики сличения и возможно проведение периодической поверки. Следует отметить, что некоторые импортные приборы не внесены в Госреестр именно по причине того, что в нашей стране отсутствует прослеживаемость некоторых видов измерений с необходимой точностью. Очевидно, что внесение приборов в Госреестр создает конкурентные преимущества на рынке при продаже прибора изготовителем или дистрибьютером.

Процедура поверки входит в сферу Государственного регулирования, а процедура калибровки не входит. В связи с этим организации, выполняющие работы по поверке, должны быть аккредитованы на право выполнения таких работ. Критерии аккредитации детально изложены в [18].

7.2 Метрологическая экспертиза

Процедуры метрологической экспертизы также лежат в сфере Государственного метрологического контроля. Метрологическая экспертиза имеет своей целью установление соответствия методов измерений, адекватности применения измерительных средств и правильного использования способов расчета погрешностей, решаемым измерительным задачам. В связи с этим метрологическая экспертиза делится на экспертизу документации и экспертизу изделия на стадиях выполнения работ по разработке новой техники. Метрологическая экспертиза изделий проводится для изделий вооружения и

военной техники, а метрологическая экспертиза документации – для изделий любых назначений.

В объем работ по метрологической экспертизе технической документации входит экспертиза текстовой конструкторской документации и экспертиза технологической документации [3]. Метрологическую экспертизу технической документации проводят путем анализа и оценивания технических решений в части метрологического обеспечения (технических решений, касающихся измеряемых параметров, установления требований к точности измерений, выбора методов и сред конструкторской документации производится анализ и оценка правильности выбора методов и средств измерений, операций и правил проведения измерений и обработки их результатов с целью установления их соответствия требованиям к выпускаемой продукции и техническим характеристикам изделий. Эти требования обычно указаны в ТУ или паспортах на изделие. При технологической экспертизе документации производится анализ методов и средств контроля точности технологических процессов, связанных с единством измерений. Методы проведения экспертизы ее этапы и особенности подробно изложены в [19].

Метрологическая экспертиза изделия вооружения и военной техники на стадиях выполнения ОКР проводится в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 8.573-2000. Для этого создается комиссия в составе заказчика, исполнителя ОКР и всех заинтересованных организаций. Целью такой экспертизы является оценка соответствия принятых технических решений и методов контроля характеристик изделий новой техники, техническому заданию на проектирование.

Экспертизу выполняют организации, аккредитованные на право выполнения экспертизы. На основании результатов экспертизы составляется заключение.

7.3 Аттестация методик (методов) измерений

В настоящее время аттестация методик – одна из форм государственного регулирования обеспечения единства измерений. В соответствии с ФЗ № 102 [14] аттестацию методик (методов) измерений, относящихся к сфере государственного регулирования, имеют право проводить юридические лица и индивидуальные предприниматели, аккредитованные в соответствии с законодательством Российской Федерации. Установлены критерии аккредитации в национальной системе аккредитации [18]. Таким образом, в сфере госрегулирования аттестация становится самостоятельным этапом «жизненного цикла» методики, выполняемым независимыми от разработчика метрологами.

На аттестацию разработчиком методики измерений представляются исходные требования к методике, документ или проект документа, регламентирующего методику, технический отчет о разработке. Аттестация включает в себя рассмотрение (экспертизу) представленных документов,

проведение теоретических, а в отдельных случаях – и дополнительных экспериментальных исследований, оформление результатов аттестации. Аттестация часто представляет собой итерационный процесс: на основании замечаний метролога разработчики корректируют те или иные положения проекта документа, регламентирующего методику. Критериями аттестации являются: полнота изложения требований и описания операций в документе на методику, наличие и обоснованность показателей точности, соответствие требованиям нормативно-правовых документов в области обеспечения единства измерений [16]. Положительные результаты аттестации оформляются свидетельством об аттестации методики (метода) измерений. Свидетельство содержит вывод о соответствии документированной методики метрологическим требованиям. Как правило, на обратной стороне свидетельства указывают метрологические характеристики методики и нормативы контроля точности измерений. К свидетельству прилагают бюджет неопределенности (структуру суммарной погрешности) измерений, а также протокол дополнительных экспериментальных исследований (если они проводились). Сведения об аттестованных методиках (методах) измерений передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

7.4 Межлабораторные сличения

В связи с интеграцией России в международные организации по аккредитации, начиная с 2015 г., постепенно вводится процедура межлабораторных сличительных испытаний (сличений). Эта процедура проводится с целью проверки квалификации лаборатории для обеспечения качества выполняемых работ и прописана в [20], участие в ней является одним из критериев аккредитации метрологической службы на право поверки средств измерений.

Межлабораторные сличительные испытания в [21] определяются как организация, проведение и оценка измерений или испытаний одинаковых или сходных образцов двумя или более лабораториями или органами инспекции в соответствии с заранее установленными условиями.

Межлабораторные сличительные испытания могут применяться для:

- определения способности отдельных лабораторий проводить специальные (арбитражные) измерения;
- установления эффективности и сопоставимости новых методов испытаний и измерений;
- обеспечения дополнительного доверия у заказчиков лаборатории;
- определения наиболее компетентных лабораторий;
- использования результатов при установлении аттестованных значений стандартных образцов;
- аттестации методик измерений.

Межлабораторные сличения включают в себя организацию, проведение измерений и оценку их результатов на специально подобранных шифрованных образцах в нескольких лабораториях в соответствии с предварительно заданными условиями. Организация и проведение работ осуществляется провайдерами межлабораторных сличений. Требования к провайдерам изложены в [22]. Провайдер исследует эталон сравнения и организует его отправку всем участникам сличений. Участники сличений независимо друг от друга проводят измерения эталона сравнения, который характеризуется номинальным значением измеряемой величины. На основании выполненных измерений участники сличений определяют оценку номинального значения и соответствующую стандартную неопределенность измерения. Полученные результаты направляются провайдеру, который по итогам анализа определяет опорное значение сличений и его неопределенность и формирует наибольшее подмножество согласованных (надежных) результатов измерений. Лаборатории с ненадежными результатами исключаются из списка участников сличений.

Выводы

Работы по метрологическому обеспечению регулируются законодательной базой Российской Федерации. Органы государственной власти следят за выполнением требований законов и подзаконных актов, в которых строго прописаны требования и правила метрологического обеспечения. Процедуры надзора за метрологическими работами позволяют обеспечить качество выпускаемых изделий и выполняемых работ и услуг, а также интегрировать отечественную промышленность в мировой рынок.

Вопросы для самопроверки

1. В каких формах проводится государственное регулирование в области обеспечения единства измерений?
2. Из чего состоит метрологическая экспертиза? Какие работы проводятся при экспертизе?
3. Для чего нужны межлабораторные сличения?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метрология уже давно сформировалась как стройная наука, ее основы были заложены более трех веков назад, а над ее развитием трудились такие величайшие мировые классики науки, как Х. Гюйгенс, П.-С. Лаплас, М.В. Ломоносов, Д.И. Менделеев, Б. Якоби, А. Купфер и др. По мере развития метрологии ее основные принципы совершенствовались, а эталоны модернизировались. В связи с развитием научных знаний возникала необходимость в более точных измерениях, поэтому достижения метрологии тесно связаны с развитием физической науки. Промышленное производство также оказывает существенное влияние на развитие измерительной техники.

Учитывая, что все развитие технического прогресса тесно связано с борьбой за точность, по мере увеличения требований к точности измерений развивалась и метрология. Сегодня ее возможности соответствуют текущим требованиям и науки и технического прогресса. Пересматриваются принципы эталонирования, развиваются новые методы сличений, достижения математики позволяют по-новому обрабатывать результаты измерений. Метрология развивается и позволяет развивать смежные знания. В условиях рыночной экономики достижения метрологии позволяют уменьшать себестоимость производств.

Основные положения метрологической науки представлены в предлагаемом учебном пособии, однако в нем отражены не все актуальные вопросы, с которыми могут встретиться инженеры и исследователи. Издание рассчитано, в первую очередь, на студентов, изучающих науку метрологию в соответствии с учебным планом занятий, однако может быть полезным и дипломированным специалистам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Академик А.Н.Крылов. Воспоминания и очерки. Изд. Академии наук СССР М. 1956.
2. МИ 2247-93. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
3. РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения.
4. Шостьин Н.А. Очерки истории русской метрологии. XI – начало XX века. – М.: Изд. стандартов, 1975.
5. Червонов С.Д, Бойцов М.А. Историческая метрология. Введение в специальные исторические дисциплины. – М.: Изд. МГУ, 1990.
6. Гельмгольц Г. Счет и измерение. – Казань: Издательство Казанского университета, 1898.
7. Российская метрологическая энциклопедия. 2-е изд. Под редакцией В.В. Окрепилова. – СПб: Лики России, 2015.
8. Лячнев В.В, Сирая Т.Н, Довбета Л.И. Фундаментальные основы метрологии. СПб: Элмор, 2007.
9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978.
11. Харт Х. Введение в измерительную технику. М.: Мир, 1999.
12. Клаассен К. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. – М.: Постмаркет, 2000.
13. Руководство по выражению неопределенности измерения / пер. с англ. под ред. проф. В.А. Слаева: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, СПб, 1999. (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).: First edition – ISO, Switzerland, 1993).
14. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» ФЗ №102, принят 26.06.2008 (редакция от 13.07.2015).
15. МИ 2148-91 ГСИ «Содержание и построение поверочных схем».
16. ГОСТ Р 8 563-2009 «Методики (методы) измерений».
17. ПР 50.2.105-09 ГСИ «Порядок утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений».
18. Приказ Минэкономразвития России от 30.05.2014 № 326 «Об утверждении критериев аккредитации, перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации, и перечня документов в области стандартизации, соблюдение требований которых заявителями, аккредитованными лицами обеспечивает их соответствие критериям аккредитации».
19. РМГ 63-2003 «Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации».

20. ГОСТ ИСО/МЭК 17025 -2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

21. ILAC-P9:06/2014 ILAC Policy for Participation in Proficiency Testing Activities In the accreditation process for inspection bodies.

22. ГОСТ ИСО/МЭК 17011-2009. «Оценка соответствия. Общие требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия».

Грязин Дмитрий Геннадиевич

д.т.н., профессор (квалификационная категория профессор практики)

Основы метрологии и метрологического обеспечения

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО Н. Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49