

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В
РАДИОПРИБОРОСТРОЕНИИ.
ЧАСТЬ 1. МЕТРОЛОГИЯ

Учебно - методическое пособие

Санкт-Петербург

2011

Составители: Т.П.Мишура

Рецензент канд. техн. наук доц. А.А.Хоменко

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с программой дисциплины “Метрология, стандартизация и сертификация”. Рассматривается первый раздел - «Метрология». Предназначены для студентов заочной формы образования по направлениям 200100.62 «Приборостроение», 230100.62 «Информационная и вычислительная техника», 162300.62 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и по специальности 162107.65 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования». Учебно-методическое пособие может использоваться студентами других технических направлений и специальностей при изучении дисциплин «Метрология и радиоизмерения», «Метрология и электрорадиоизмерения», «Метрология и технические измерения» как вечерне-заочной, так и дневной формы обучения для изучения раздела «Метрология». Подготовлено кафедрой «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» и рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.



Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения , 2011

Лицензия ЛЗ № 020341 от 07.05.97г

Подписано к печати

Формат 60*84 Г1

Бумага тип №3

Печать офсетная

Усл. печ. л.

Уч.-изд. л.

Тираж экз.

Заказ

Редакционно-издательский отдел
оперативной полиграфии

СПб ГУАП

190000 , Санкт-Петербург, ул. Б.Морская , 67

Условные сокращения

ГА – Гражданская авиация

ГМК и Н – Государственный контроль и надзор

ГМС – Государственная метрологическая служба

ГСИ – Государственная система обеспечения единства измерений

МБМВ - Международное бюро мер и весов

МГС - Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ

МКМВ - Международный комитет мер и весов

МОЗМ - Международная организация законодательной метрологии

МОМВ - Международная организация мер и весов

МЭК - Международная электротехническая комиссия

МХ – метрологическая характеристика

НСП – не исключенная систематическая погрешность

ПК – профессиональные компетенции

РСК – Российская система калибровки

РЭО – радиоэлектронное оборудование

СИ – Средства измерения

ФВ – физическая величина

ФГОС – Федеральный Государственный образовательный стандарт

ISO (ИСО) - Международная организация по стандартизации

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие предназначено для студентов университета, у которых метрология, стандартизация и сертификация не являются основной специальностью. Введение данного курса в учебные программы обусловлено все возрастающей ролью метрологии как науки об измерениях и различных аспектов технического регулирования в развитии науки и техники, в производстве, в торговле, образовании, бытовом обслуживании, в повышении качества товаров и

услуг и в других областях человеческой деятельности. Пособие охватывает раздел «Метрология» и составлено в соответствии с программой курса «Метрология, стандартизация и сертификация». В нем рассмотрены основы метрологии и технического регулирования. При написании учебного пособия были использованы вышедшие в последнее время нормативные документы и публикации в периодической печати, касающиеся различных аспектов деятельности в области метрологии. В частности, рассмотрены положения Федерального закона «О техническом регулировании».

Курс «Метрология, стандартизация и сертификация» построен в соответствии с требованиями Федерального Государственного образовательного стандарта по направлениям 200100.62 «Приборостроение», 230100.62 «Информационная и вычислительная техника», 162300.62 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и по специальности 162107.65 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования». В соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) согласно изложенным задачам профессиональной деятельности и целям основной образовательной программы по соответствующим направлениям подготовки бакалавров и специалистов дисциплина «Метрология, стандартизация и сертификация» входит в цикл общепрофессиональных дисциплин (БЗ). Программа разработана таким образом, что обеспечивает выполнение требований ФГОС по направлениям 200100.62 «Приборостроение», 230100.62 «Информационная и вычислительная техника», 162300.62 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и по специальности 162107.65 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Технический прогресс, совершенствование технологических процессов, производство точных, надежных и долговечных машин и приборов, повышение качества продукции, обеспечение взаимозаменяемости и кооперирования производства невозможны без развития метрологии и постоянного совершенствования техники измерений.

Основу деятельности бакалавра и инженера составляет содержание в постоянной готовности к применению радиоэлектронного оборудования (РЭО).

Для обеспечения безопасности и высокой эффективности его работы необходимо обладать навыками квалифицированного выбора методов, средств контроля и диагностирования технического состояния радиоаппаратуры, в том числе для полетов в гражданской авиации (ГА).

С целью достижения высокого качества изделий в процессе их производства необходим контроль технологических операций. Это требует непрерывного повышения точности и надежности средств измерений.

Ошибочные результаты измерения из-за некачественного выполнения собственно измерений столь же часты, как и при использовании средств измерений несоответствующего класса точности. Как в том, так и в другом случае возникает необнаруженный дефект, который приводит к браку на последующих этапах процесса производства или к снижению качества изделий, их надежности и долговечности. Поэтому задача специалиста заключается в организации метрологического сопровождения технологических процессов производства радиотехнических устройств, а также в умении обоснованно выбирать современные средства измерений и осуществлять контроль характеристик выпускаемой и эксплуатируемой продукции.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Современное состояние метрологии и радиоизмерений и перспектива их развития предъявляют повышенные требования к уровню метрологической подготовки бакалавров и специалистов. Целью преподавания дисциплины “Метрология, стандартизация и сертификация” является формирование у студентов знаний в соответствии с задачами профессиональной деятельности и целями основной образовательной программы по соответствующим направлениям подготовки бакалавров.

Основные задачи изучения дисциплины:

- сформировать у студентов творческий подход к решению проектно-конструкторских, производственно-технологических задач, задач эксплуатации транспортного радиооборудования;

- выработать навыки в организационно-управленческой деятельности;

- развить системное понимание подходов к решению технических задач и формирования алгоритмов проектных решений;

- выработать навыки для технического и организационного обеспечения исследований в области научно-технической деятельности;

- В результате освоения учебной программы студент должен

знать:

- основы метрологии, измерений и контроля, системы стандартизации и сертификации, основные понятия, связанные со средствами измерений;

- методы и средства измерений радиотехнических устройств;

- основные стандарты в области приборостроения и инфокоммуникационных систем и технологий, в том числе стандарты Единой системы программной документации;

- международную систему единиц физических величин;

- физические основы и методы измерений,

- методы оценки погрешностей измерения;

- методы контроля и управления качеством, систему стандартизации и сертификации на воздушном транспорте;

- основы государственного регулирования и управления в сфере технической эксплуатации летательного аппарата;

уметь

- выбирать, комплексовать и эксплуатировать программно-аппаратные средства в создаваемых вычислительных и информационных системах и сетевых структурах;

- владеть методами и средствами разработки и оформления технической документации;

- пользоваться современными средствами измерения и контроля и обосновывать выбор таких средств для решения конкретных задач;
- использовать методы и средства контроля и диагностирования технического состояния радиоэлектронного оборудования обеспечения полетов;
- рассчитывать погрешности измерений, определять и использовать количественные оценки качества;
- формировать перечень документации, необходимой для сертификации объектов технической эксплуатации;
- **владеть**
- способностью обеспечить метрологическое сопровождение технологических процессов производства приборов и их элементов, использовать типовые методы контроля характеристик выпускаемой продукции и параметров технологических процессов;
- способностью проводить измерения и исследование по заданной методике с выбором средств измерений и обработкой результатов;
- способностью использовать системы стандартизации и сертификации, осознавать значение метрологии в развитии техники и технологий;
- способностью контролировать соответствие технической документации разрабатываемых проектов стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам.
- навыками творческого подхода к процессу разработки бизнес-планов и технических заданий на оснащение отделов, лабораторий, офисов компьютерным и сетевым оборудованием;
- методами настройки и наладки программно-аппаратных комплексов;
- методами сопряжения аппаратных и программных средств в составе информационных и автоматизированных систем;
- методами расчета и измерения технических характеристик и параметров узлов и устройств аналого-дискретной и (или) цифровой обработки сигналов;
- методами выбора измерительных приборов при определении характеристик радиоэлектронных устройств разного назначения;

- методами расчета погрешностей измерений, методами контроля качества, принципами сертификации объектов радиотехнического обеспечения полетов, принципами сертификации объектов воздушного транспорта.

В процессе освоения дисциплины у студента формируется перечень профессиональных компетенций (ПК) в соответствии с ФГОС.

По направлению 20010062:

- способность проводить исследования, обрабатывать и представлять экспериментальные данные (ПК-4);
- способность использовать системы стандартизации и сертификации, осознание значения метрологии в развитии техники и технологий (ПК-5);
- готовность составлять отдельные виды технической документации, включая технические условия, описания, инструкции и другие документы (ПК-13);
- способность участвовать в монтаже, наладках, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов техники (ПК-14);
- способность проводить измерения и исследования по данной методике с выбором средств измерений и обработкой результатов (ПК-25);
- способность контролировать соответствие технической документации разрабатываемых проектов стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам (ПК-32).

По направлению 162300.62:

- способностью проводить измерения и инструментальный контроль при эксплуатации авиационной техники, проводить обработку результатов и оценивать погрешности (ПК-4);
- способностью использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией (ПК-6);
- способностью к решению задач планирования, организации, информационного и аппаратного обеспечения производственных процессов технического обслуживания и ремонта летательных аппаратов, используя базовые профессиональные знания (ПК-7);

- способностью к размещению, использованию и обслуживанию технологического оборудования в соответствии с требованиями технологической документации и на основе профессиональных базовых знаний (ПК-12);

- способностью к участию в проведении комплекса планово-предупредительных работ по обеспечению исправности, работоспособности и готовности объектов авиационной техники к эффективному использованию по назначению (ПК-14);

- способностью решать вопросы обеспечения качества технического обслуживания и ремонта летательных аппаратов, а также процессов сертификации авиационной техники и аттестации авиаперсонала (ПК-15);

- способностью к организации метрологического обеспечения технологических процессов технического обслуживания и ремонта летательных аппаратов (ПК-16);

- готовностью к проведению контроля, диагностирования, прогнозирования технического состояния, регулировочных и доводочных работ, испытаний и проверки работоспособности авиационных систем и изделий (ПК-21);

- способностью применять средства наземного обслуживания авиационной техники, контрольно-измерительной аппаратуры, средств механизации и автоматизации производственных процессов, средств вычислительной техники (ПК-22).

По направлению 230100.62:

- готовить научно-технические отчеты по результатам выполненной работы, оформлять результаты исследований в виде статей, докладов на научно-технических конференциях (ПК-7);

- участвовать в настройке и наладке программно-аппаратных комплексов (ПК-9);

- сопрягать аппаратные и программные средства в составе информационных и автоматизированных систем (ПК-10).

По специальности 162107.65:

- способностью самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ОК-3);

- способностью к обобщению, анализу, критическому осмыслению, систематизации, прогнозированию, постановке целей и выбору путей их достижения (ОК-8);

- способностью возглавить проведение комплекса планово-предупредительных работ по обеспечению исправности, работоспособности и готовности транспортного радиооборудования, его систем электропитания к использованию по назначению с наименьшими эксплуатационными затратами (ПК-8);

- готовностью к проведению испытаний и определению работоспособности установленного и эксплуатируемого транспортного радиооборудования (ПК-9);

- способностью решать вопросы обеспечения качества технического обслуживания и ремонта транспортного радиооборудования, а также процессов его сертификации (ПК-15);

- способностью планировать, организовывать и совершенствовать системы технической эксплуатации транспортного радиооборудования, контроля и управления качеством процессов технической эксплуатации транспортного радиооборудования, учета и документооборота (ПК-18);

- способностью разработки рациональных нормативов эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и хранения транспортного радиооборудования (ПК-19);

- способностью к организации и осуществлению метрологического обеспечения технологических процессов технической эксплуатации транспортного радиооборудования (ПК-26);

- готовностью к участию в разработке технической и технологической документации для технического обслуживания и ремонта транспортного радиооборудования (ПК-27);

- способностью к разработке проектов, технических условий, требований, технологий, программ решения производственных задач и нормативной документации для новых объектов профессиональной деятельности (ПК-28);

- способностью анализировать результаты технической эксплуатации транспортного радиоэлектронного оборудования, динамики показателей качества объектов профессиональной деятельности с использованием проблемно ориентированных методов и средств исследований, а также разрабатывать рекомендации по повышению уровня эксплуатационно-технических характеристик (ПК-31).

Дисциплина базируется на знаниях, ранее приобретенных студентами при изучении следующих дисциплин учебных планов профилей кафедры по направлениям «Введение в приборостроение», «Введение в направление», «Физические основы получения информации», «Основы проектирования приборов», «Основы проектирования электронных средств», «Физико-химические основы технологии», «Основы технологии приборостроения», «Основы конструирования электронных средств», «Конструирование приборной аппаратуры».

Знания и навыки, полученные при изучении материала данной дисциплины в соответствии с учебными планами направлений 200100.62, 162300.62, 230100.62 и специальности 162107.65 имеют как самостоятельное значение, так и используются при изучении других дисциплин: «Конструирование бортовых приборных устройств», «Конструирование бортовых электронно-вычислительных средств», «Основы автоматизации технологических процессов», «Основы искусственного интеллекта и экспертных систем», «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования», «Организация технического обслуживания и ремонта радиоэлектронных систем воздушного транспорта», «Безопасность полетов и в процессе дипломного проектирования».

В учебно-методическом пособии приведены программа и методические указания для самостоятельного изучения дисциплины. Теоретический материал охватывает все основные разделы в объеме, необходимом для понимания.

Методические указания ориентируют студентов на главные аспекты каждого раздела и позволяют, воспользовавшись приведенной литературой, самостоятельно их изучить. Даны вопросы для самопроверки и контрольные задания, которые дополняют теоретический материал закрепляют приобретенные знания.

Пособие ориентированно в основном на вечерне-заочную форму обучения, поэтому основной форма изучения материала является самостоятельная работа студентов над литературой. Согласно учебному плану каждый студент выполняет лабораторные работы, контрольное задание, сдает зачет или экзамен.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

2.1.1. Общие сведения. Основные метрологические термины и понятия

В современном понимании метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности (определение Рекомендация РМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения»).

Предмет метрологии как науки об измерениях составляют следующие задачи:

- общая теория измерений;
- единицы физических величин и их системы;
- методы и средства измерений;
- методы определения точности измерений;
- основы обеспечения единства измерений;
- эталоны единиц физических величин;

- методы передачи размеров единиц от эталонов к рабочим средствам измерений.

Основные метрологические термины и понятия

Измерение - совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины. (Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99 Метрология. Основные термины и определения, 1999 г).

Приведенное выше определение измерения могут быть выражены **основным уравнением измерений**:

$$x = \{x\}[x],$$

где x – измеряемая величина; $\{x\}$ – числовое значение измеряемой величины; $[x]$ – единица измерения.

Основными характеристиками измерений являются результат, погрешность, точность, правильность, сходимость, воспроизводимость и достоверность.

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

Часто в полученный результат вносят поправки. Поправка – значение величины, одноименной с измеряемой, которая вводится в результат измерения для исключения определенных, так называемых систематических составляющих погрешности, что находит отражение в терминологии:

- неисправленный результат измерения – значение физической величины, полученное при помощи средств измерения до внесения поправок;
- исправленный результат измерения – значение физической величины, полученное при помощи средств измерений и уточненное путем внесения в него необходимых поправок.

Погрешность средства измерения – разность между показаниями средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Точность измерений - понятие, характеризующее близость результатов измерений к истинному значению измеряемой величины и отражающее близость к нулю погрешности результата измерений. Точность и погрешность измерений связаны обратной зависимостью.

Правильность измерений – это метрологическая характеристика, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результат измерений.

Сходимость результатов измерений характеризует качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами и средствами измерений и в одних и тех же условиях.

Воспроизводимость результатов измерений – характеристика качества измерений физической величины, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенными к одним и тем же условиям.

Достоверность измерений определяется степенью доверия к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах, или в указанном интервале (доверительный интервал)

Единство измерений - такое их состояние, когда результаты измерений выражаются в узаконенных единицах величин, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. Единство результатов обеспечивает сопоставимость результатов измерений, полученных в разных местах и в разное время, с помощью различных методов и средств измерений обеспечивает единство.

Основная цель метрологии - познание окружающего мира. Метрология включает в себя методы выполнения практически всех измерений, а также их

правовые и теоретические основы. Отсюда метрология делится на теоретическую (фундаментальную, научную), законодательную (правовую), прикладную (практическую). Предмет метрологии – извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью.

Современное состояние исследований требует непрерывного повышения точности измерений. Одним из реальных путей решения этой задачи является переход от традиционного принципа иерархии метрологического обеспечения к автономному, когда меры создаются на основе природных физических констант.

Отличительной чертой автономных мер является использование физических эффектов высокой стабильности, строго определенных зависимостей ФВ через значения фундаментальных постоянных. Метрологию, занимающуюся фундаментальными природными константами, называется **квантовой**. Квантовые средства измерений имеют преимущества перед обычными средствами измерений.

Особое место в перспективе развития метрологии занимает метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции nanoиндустрии. Предполагается, что в ближайшем будущем область нанотехнологий станет ведущим направлением в различных секторах промышленности – наноэлектронике, нанофотонике, наноинженерии, наноматериалов, нанобиотехнологии, нанотехнологии систем безопасности и др.

Специфика нанотехнологий привела к развитию нового направления в метрологии – нанометрология, с которой связаны все теоретические и практические аспекты метрологического обеспечения единства измерений в нанотехнологиях.

Во-первых, это эталоны физических величин, стандартные образцы состава, структуры и свойств для обеспечения передачи размера единиц физических величин в нанодиапазоне.

Во-вторых, это аттестованные или стандартизованные методики измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологий; методики калибровки (поверки) самих средств измерений, применяемых в нанотехнологиях.

В-третьих, это метрологическое сопровождение технологических процессов производства материалов, структур и иной продукции нанотехнологий.

Новые возможности изделий наноиндустрии и свойства наноматериалов предъявляют особые требования к применяемым средствам измерений и их метрологическому обеспечению.

Решение этих задач необходимо осуществлять при тесном взаимодействии с международными организациями, осуществляющими деятельность в области стандартизации и обеспечения единства измерений (п.2.4.6.).

Для координации работ европейских метрологических институтов и для удовлетворения потребностей в промышленности ЕВРОМЕТ разработан проект под названием «Инициатива ЕВРОМЕТ по нанотехнологии».

Основными проблемами системы обеспечения единства в наноиндустрии являются:

- неопределенность приоритетных направлений развития нанотехнологий. Это не позволяет сформулировать приоритетные измерительные задачи и решить, какие эталоны можно модернизировать, а какие необходимо создавать заново;
- отсутствие четких требований к точности и динамическим диапазонам средств измерений;
- необходимость во многих случаях совмещать измерительные и технологические процессы, что требует объединять измерительное и технологическое оборудование в единый технологический комплекс;
- ограниченная номенклатура отечественного и высокая стоимость импортного контрольно-измерительного оборудования, что не позволяет на высоком уровне оснастить лаборатории и технологические участки предприятий;
- недостаточное количество аттестованных методик выполнения измерений, поверки, калибровки и испытаний средств измерений, соответствующих международным требованиям.

Следует подчеркнуть возможность измерений в нематериальной сфере. Раздел метрологии, посвященный измерению качества, называется квалиметрией.

Методические указания

При изучении этого раздела следует уяснить, что включает в себя понятие «метрология», каковы ее задачи. Усвоить основные метрологические термины и понятия. Представлять современное состояние и перспективы развития измерений: преимущества квантовой метрологии перед традиционной, основанной на иерархическом принципе, какие квантовые эффекты используются для разработки квантовых средств измерений, в чем их преимущество перед обычными. Ознакомиться с основными проблемами и перспективами развития нанометрологии.

Литература [1, с. 1- 14]; [2, с. 4 – 8]; [3, с. 119 – 125]; [4, с. 26 – 28].

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятию «метрология».
2. Назовите основные характеристики измерений, дайте определение каждой из них.
3. В чем заключается техническая, метрологическая и познавательная сторона измерений?
4. Запишите основное уравнение измерений и поясните его суть.
5. Какова роль метрологии в теории познания и каковы ее задачи?
6. Современное состояние и перспективы развития измерений.
7. Что такое квантовая и нанометрология?
8. Какие пути решения повышения точности измерения Вы знаете?
9. Перечислите известные Вам фундаментальные физические константы.

2.1.2 Физические величины. Системы физических величин. Системы единиц физических величин

Объектом измерений являются физические величины.

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

Измерение физической величины - экспериментальное сравнение одной измеряемой величины с другой известной величиной того же качества, принятой за единицу или шкалой.

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

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

Истинное значение физической величины — значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину (может быть соотнесено с понятием абсолютной истины и получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений).

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

Оценивание величины – операция приписывания данной физической величине определенного числа принятых для нее единиц, проведенная по установленным правилам. Например, определение силы ветра или землетрясения, выставление оценки фигуристам или оценок знаний учащихся по пятибалльной шкале.

Единица измерения физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение,

равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

Система физических величин – совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие определяются как функции этих.

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

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

Физическая величина x может быть выражена при помощи математических действий через другие физические величины $A, B, C \dots$ уравнением вида:

$$x = A^\alpha B^\beta C^\gamma, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности; α, β, γ – показатели степени.

Формулы вида (1), выражающие одни физические величины через другие, называются **уравнениями между физическими величинами**. Коэффициент пропорциональности в таких уравнениях за редким исключением равен 1. Значение этого коэффициента не зависит от выбора единиц, а определяется только характером связи величин, входящих в уравнение.

Для каждой системы величин число основных величин должно быть вполне определенным, и его стараются свести к минимуму. **Основные величины** могут выбираться произвольно, но важно, чтобы система была удобной для практического применения. Как правило, в качестве основных выбирают величины, характеризующие коренные свойства материального мира

Система единиц физических величин — совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принципами для заданной системы физических величин. Например, международная система единиц СИ.

Основная единица системы — единица основной физической величины в данной системе единиц.

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

Системная и внесистемная единицы – единицы, входящие и не входящие в принятые системы единиц.

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

Международная система единиц была утверждена в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам (русское обозначение СИ, международное SI) на основе шести основных единиц. В 1971 к СИ была добавлена седьмая основная единица – количества вещества (моль). Основным принципом при построении системы единиц является *удобство* использования единиц в науке, промышленности, торговли. При этом руководствуются рядом правил: простотой образования производных единиц, высокой точностью воспроизведения основных и производных единиц и близостью их размеров к размерам физических величин, чаще всего встречающихся в практической деятельности. Кроме того, число основных единиц всегда стараются сделать минимальным. Построение системы, в принципе, вполне произвольно. Произвольным является число и сам подбор основных величин, размер основных единиц и выбор определяющих уравнений.

В настоящее время в РФ действует межгосударственный стандарт ГОСТ 8.417-2002, который устанавливает единицы физических величин, применяемых в стране. В стандарте указано, что подлежат обязательному применению единицы системы СИ, а также десятичные кратные и дольные этих единиц.

Методические указания

После изучения этого раздела необходимо знать основные определения, относящиеся к понятию «физические величины», уметь привести примеры основных, производных, дополнительных, внесистемных, обратите внимание на правила построения системы физических величин, уравнение между физическими величинами, которое позволяет выразить одну физическую величину через другие. При изучении этого раздела необходимо подробно изучить структуру ГОСТ 8.417-2002. Обратите внимание на правила образования когерентных производных единиц и написания их обозначений.

Литература: [2, с. 8 - 11]; [3, с. 215 - 216]; [4, с. 16 - 19].

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под физическими и нефизическими величинами?
2. Что такое размер и значение физической величины?
3. Что такое истинное значение ФВ?
4. Что такое действительное значение ФВ?
5. Какая разница между оцениванием и оценкой величины?
6. Что такое основная и производная физическая величина?
7. Напишите уравнение, связывающее одну физическую величину через другие. Поясните все входящие в него обозначения.
8. Перечислите основные принципы выбора основных физических величин.
9. Что такое размерность основной и производной величины?
10. Что такое основная и производная единица физической величины?
11. Что такое системная и внесистемная единицы? Какие группы внесистемных единиц Вы знаете?
12. Что такое когерентная система единиц физических величин? Как образуются когерентные производные единицы?
13. Что такое кратная и дольная единица величины? Приведите примеры.
14. Что такое относительные и логарифмические величины и единицы? Приведите примеры.
15. Какими правилами руководствуются при построении системы единиц?

16. Перечислите известные Вам международные системы единиц. Дайте краткую характеристику каждой.

17. Перечислите преимущества системы СИ перед другими системами.

18. Каков порядок построения системы СИ?

19. Сколько основных и дополнительных единиц включено в систему СИ?

Перечислите их.

20. Приведите примеры производных единиц.

21. Какие области использования физических единиц выделены в стандарте?

2.1.3. Воспроизведение единиц физических величин и передача их размеров.

Эталоны и их использование

Согласно Закону РФ "Об обеспечении единства измерений" **единство измерений** – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью. Решение задачи обеспечения единства измерений требует тождественности единиц одной и той же величины, которые передаются средствам измерения. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения единиц физических величин и передачи их размеров используемым средствам измерений.

Под **воспроизведением** единицы физической величины понимается совокупность операций по ее материализации путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии с ее определением. Централизованное воспроизведение единиц осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых эталонами

Эталон – это техническое устройство, обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи информации о ее размере средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона.

Под **передачей** размера единицы величины понимается приведение размера величины, хранимой средством измерений, к размеру единицы,

воспроизводимой эталоном. Эта процедура осуществляется при поверке средств измерений.

В настоящее время в стране действует примерно 130 эталонов единиц физических величин. Эталоны классифицируют по ряду признаков. Соответственно делению физических единиц различают эталоны основных и производных единиц, а по точности воспроизведения единиц и подчиненности – первичные, вторичные и рабочие.

Первичный эталон воспроизводит единицу с наивысшей (по сравнению с другими эталонами той же величины) точностью.

Международный эталон представляет собой соответствующую единицу, которая воспроизводится с максимально возможной точностью, обеспечиваемой принятым методом измерения. Эталоны определяются международным соглашением. Они хранятся в Международном бюро мер и весов в Севре вблизи Парижа. Эти эталоны не подлежат использованию для измерений или для калибровки.

Первичные эталоны хранятся в национальных лабораториях различных стран. Эти эталоны недоступны для использования вне данной национальной лаборатории, хотя их можно использовать для калибровки присланных в лабораторию вторичных эталонов. Сами первичные эталоны калибруются в национальных лабораториях путем проведения абсолютных измерений, результаты которых выражаются в фундаментальных единицах.

Государственный первичный эталон – это эталон, признанный в качестве исходного на территории государства.

Вторичный эталон получает размер единицы от первичного эталона. Вторичные эталоны хранятся в различных лабораториях отрасли производства. Их основная функция заключается в контроле и калибровке рабочих эталонов.

Рабочий эталон предназначен для передачи размера единицы рабочим средствам измерений, так как для поверки многочисленных рабочих средств измерений нецелесообразно использовать очень точный и дорогой первичный эталон. Основными эталонами в отраслевой поверочной лаборатории служат

рабочие эталоны. Они используются для контроля и калибровки другого лабораторного инструмента. Рабочие эталоны периодически сверяются с вторичными эталонами. Рабочие эталоны подразделяют на разряды: 1-й, 2-й и т.д.

Обеспечение правильной передачи размера единиц физических величин (и, как следствие, обеспечение единства измерений) во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем.

Поверка средств измерений – установление органом государственной метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности СИ к применению на основе экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

Поверке подвергают СИ, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору и используемые в здравоохранении, охране окружающей среды, обеспечении безопасности труда, обороны, в торговых, банковских, почтовых операциях, при испытаниях контроля качества продукции и в других важных сферах деятельности.

При поверке рабочих средств измерений используют эталон, как правило, рабочий эталон, а процедура проведения поверки регламентируется обязательными требованиями, которые устанавливаются нормативными документами по поверке. В качестве таких документов используются либо методические указания по поверке, либо государственные (национальные) стандарты. Например, ГОСТ 8.355-79. «Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки».

Общие вопросы организации и проведения поверки регламентируются Правилами по метрологии Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ). Например, «ПР 50.2.006-94. Правила по метрологии. Порядок проведения поверки средств измерений».

Проводят поверку специально обученные специалисты, аттестованные в качестве поверителей органами Государственной метрологической службы.

Результаты поверки средств измерений, признанных годными к применению, оформляют выдачей свидетельства о поверке, нанесением

поверительного клейма на приборы или в техническую документацию (паспорт) прибора. Поверку СИ могут проводить также метрологические службы юридических лиц, аккредитованные на право поверки средств измерений в государственных метрологических органах. Различают несколько видов поверки.

Поверочная схема для средства измерения – нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измерений, с указанием методов и погрешности при передаче. Различают государственные (на все средства измерений данной величины в стране) и локальные поверочные схемы (на средства измерений в регионе, отрасли, предприятии). Требования к поверочным схемам определены стандартом ГСИ «ГОСТ 8.061-80. Поверочные схемы. Содержание и построение». Государственная поверочная схема передачи единиц измерения физических величин от эталонов к образцовым и рабочим средствам измерений представлена на рис. 1. Согласно представленной схеме между разрядами рабочих эталонов существует соподчиненность: рабочие эталоны 1 разряда поверяются, как правило, непосредственно по вторичным эталонам, рабочие эталоны 2-го и последующего разрядов подлежат поверке по рабочим эталонам непосредственно предшествующих разрядов. Как видно из данной схемы, рабочие средства измерений высшей точности могут поверяться по рабочим эталонам 1 разряда; рабочие средства измерений высокой точности – по рабочим эталонам 2 разряда; средней точности – по рабочим эталонам 3 разряда; нормальной точности – по рабочим эталонам 4 разряда; технические средства измерений – по рабочим эталонам 5 разряда.

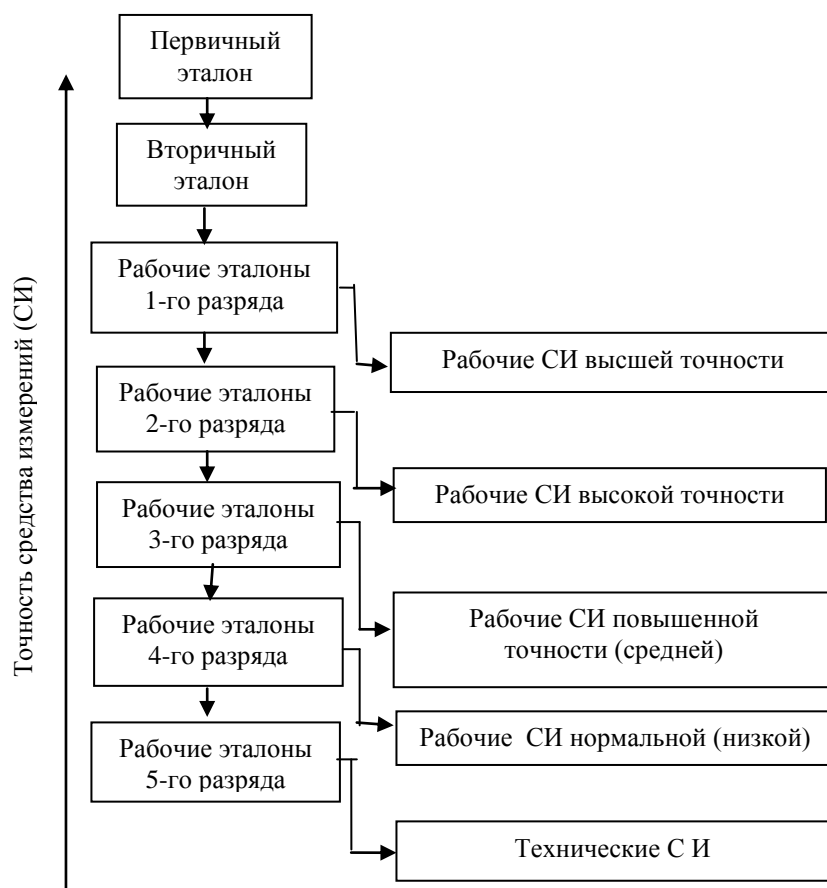


Рис. 1 -- Государственная схема передачи единиц измерения физических величин от эталонов к образцовым и рабочим средствам измерений

Средства измерений, не входящие в сферу государственного метрологического контроля, могут подвергаться калибровке.

Калибровка средства измерений – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик и (или) пригодности к применению СИ, не подлежащему ГМК и Н.

Калибровке присущ ряд особенностей по сравнению с поверкой. Это добровольная процедура и она может выполняться любой метрологической службой. При этом аккредитация на право калибровки также является добровольной (не обязательной) процедурой.

Хотя калибровка может проводиться любой метрологической службой и является добровольной процедурой, для ее проведения необходимы определенные условия. Основное из них – прослеживание измерений, т.е. обязательная передача размера единицы от эталона к калибруемому рабочему средству измерений.

Для проведения калибровочных работ в РФ создана Российская система калибровки (РСК), в которую входят государственные научные метрологические центры, органы государственной метрологической службы (ГМС), метрологические службы юридических лиц, объединенные целью обеспечения единства измерений в сферах, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору (ГМКиН).

РСК базируется на принципах:

- обязательность передачи размеров единиц от государственных эталонов к рабочим СИ;
- профессионализм и техническая компетентность;
- самоокупаемость.

Результаты калибровки удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на СИ, или свидетельством о калибровке, а также записью в эксплуатационные документы.

Результаты калибровки позволяют определять:

- действительные значения измеряемой величины;
- поправки к показаниям средств измерений;
- погрешность средств измерений.

Эталонная база РФ состоит из 123 государственных первичных эталонов, из которых шесть эталонов основных единиц, и более 300 вторичных эталонов. Государственные эталоны служат для воспроизведения физических величин, поэтому структура эталонной базы соответствует структуре единиц СИ. Основа этой базы — эталоны основных единиц СИ кроме эталона единицы количества вещества (моль).

Длина (м) - метр. Метр равен длине отрезка, которую свет проходит в вакууме за $1/299792458$ долю секунды.

Масса (кг)- килограмм. Представлен массой международного эталона килограмма.

Особое место среди основных физических величин занимает масса, поскольку ее определяют путем сравнения с эталоном, который хранится в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа. Этот эталон представляет собой цилиндр из сплава 90% платины и 10% иридия, высота и диаметр которого равны 39 мм.

Всего было изготовлено 43 эталона и 42 были распределены между государствами, подписавшими метрическую конвенцию. В РФ имеется 2 эталона килограмма – N12 и N26. Первый является государственным эталоном, а второй – эталоном-копией.

Государственный первичный эталон единицы массы состоит из национального прототипа килограмма и эталонных весов, предназначенных для передачи размера единицы массы вторичным эталонам. Среднее квадратическое отклонение (СКО) относительной погрешности воспроизведения эталоном единицы массы равно $2 \cdot 10^{-9}$.

Следует отметить, что при таком определении килограмма не выполняется базовый критерий выбора основных единиц системы ФВ. Эталон килограмма является единственным уничтожаемым эталоном из всех основных единиц СИ. Он подвержен старению и требует громоздких поверочных схем. Современное развитие науки пока не позволяет с достаточной точностью связать единицу килограмма с естественными атомными константами. Пока не удастся точно выразить величину эталонной массы через фундаментальные постоянные. В настоящее время ведутся работы по созданию “естественного” эталона единицы массы, например, используя счет числа молекул.

Температура (К) - градус кельвина. Основной термодинамической величиной является термодинамическая температура. Она измеряется в кельвинах.

Поскольку для температуры существует значение абсолютного нуля, то для определения этой величины необходимо зафиксировать еще одну точку. В качестве нее

выбрана тройная точка воды. **Кельвин** - единица термодинамической температуры, равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. Погрешность определения тройной точки воды $2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{K}$.

Практическое измерение температуры проводят с помощью Международной практической температурной шкалы, которая основана на целом ряде хорошо воспроизводимых фиксированных температурных точек.

Время (с)- секунда. Секунда в настоящее время определяется следующим образом. Секунда равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома ^{133}Cs в отсутствии внешних помех.

Эталон секунды реализуется с помощью цезиевого излучения. Нужно уметь сосчитать 9192631770 периодов атомного излучения. Этот эталон является также эталоном единицы частоты – герца. Он обеспечивает воспроизведение единиц с СКО результата не больше $2 \cdot 10^{-13}$.

Электромагнитное излучение описывается с помощью так называемых энергетических фотометрических величин (энергия излучения - джоуль, поток излучения - ватт), которые выражаются через первые три основные единицы. Если же нужно описать излучение через его воздействие на глаз, то для этого используют соответствующие фотометрические (светотехнические) величины. Основной величиной при этом служит сила света, которая измеряется в канделах.

Кандела (кд) – сила света источника, монохроматическое излучение которого частотой $540 \cdot 10^{12}$. герц, излучаемое в определенном направлении в телесный угол величиной 1 стерadian, имеет мощность $1/683$ ватта. Частота $540 \cdot 10^{12}$ Гц соответствует длине волны 555 нм, при которой глаз обладает максимальной чувствительностью.

Решением XIV Генеральной конференции по мерам и весам (1971г.) в число основных единиц СИ была включена единица **количества вещества** – моль. **Моль** представляет собой количество вещества в системе, содержащей столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 килограмма изотопа углерода ^{12}C .

Введение этой единицы встречено неоднозначно. При введении моля был допущен ряд отступлений от принципов образования систем ФВ. Не дано четкого определения основополагающего определения количества вещества. Моль является расчетной единицей и эталона для его воспроизведения нет.

Ампер - постоянный ток, который протекая в двух параллельных проводниках бесконечной длины и незначительного поперечного сечения, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, обеспечит силу воздействия между ними $2 \cdot 10^{-7}$ Н на участке длиной в 1 м. Эта единица называется **абсолютным ампером**. Ее возможно измерить с помощью токовых весов (рис. 1.6), которые представляют собой высокочувствительные равноплечие весы, у которых вместо одной из чашек подвешена плоская однослойная катушка, уравниваемая гирями, помещенными на другую чашку. Другая катушка, не связанная с весами, располагается коаксиально первой и соединяется с ней последовательно. Когда по катушке протекает ток, вследствие электрического взаимодействия подвижная катушка опускается, и для сохранения равновесия весов необходимо добавить на правую чашку компенсирующий груз, зная массу груза и параметры катушек можно определить силу тока.

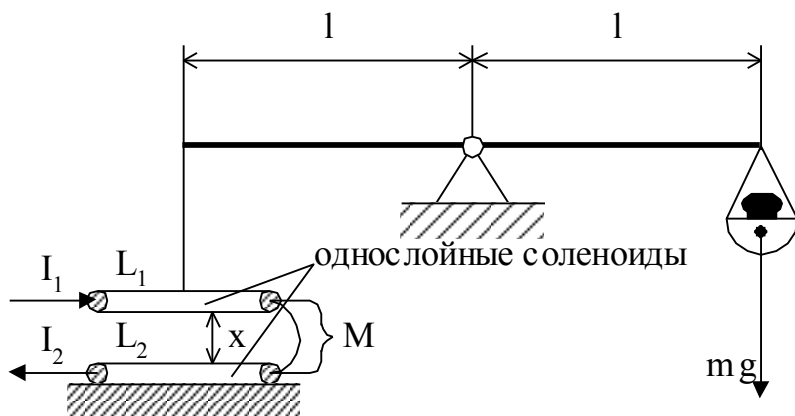


Рис. 2 - Токовые весы: M – взаимная индуктивность;

x – перемещение катушки; $I_1=I_2$ – встречные токи

Весы имеют дистанционное управление. Цена деления весов – 10^{-7} кг. Значение силы постоянного электрического тока, воспроизводимое эталоном составляет 1.018646А. Когда по катушке протекает ток, вследствие электрического взаимодействия подвижная катушка опускается, и для сохранения равновесия

весов необходимо добавить на правую чашку компенсирующий груз, зная массу груза и параметры катушек можно определить силу тока. Весы имеют дистанционное управление. Цена деления весов – 10^{-7} кг. Значение силы постоянного электрического тока, воспроизводимое эталоном составляет 1.018646А.

Особого рассмотрения требует вопрос о двух дополнительных единица системы СИ.

Плоский угол - радиан (рад). **Рад** - угол между двумя радиусами круга, вырезающими на окружности дугу, равную радиусу.

Телесный угол - стерadian (ср). **Стерadian** - телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равновеликую квадрату со стороной, равной радиусу сферы.

Эталонная база России, представляющая собой совокупность государственных первичных, вторичных и рабочих эталонов, является технической основой обеспечения единства измерений.

Эталон ампера строится на основе эталонов напряжения и сопротивления с применением закона Ома. Ток пропускается через токовые клеммы точного стандартного четырехполюсника сопротивления, и падение напряжения между соответствующими клеммами измеряется точным потенциометром, который питается от стандартного источника питания.

Государственный эталон Ома состоит из группы манганиновых катушек с номинальным сопротивлением 1 Ом и мостовой измерительной установки. Сопротивление определяется на основе закона Ома. Через обмотку катушки пропускается ток, а со второй пары клемм снимается напряжение. Среднее значение сопротивлений группы из 10 катушек, определяющее значение единицы равно 1.0000002 Ом.

В качестве мер сопротивления применяются **образцовые резисторы**, выполненные в виде катушек с одним значением сопротивления $10^{\pm N}$, где N – целое число. Применяются и наборы образцовых резисторов – магазины

сопротивлений. Основной характеристикой образцового сопротивления является относительная погрешность подгонки меры под заданный номинал:

$$\gamma = \frac{R_n - R_{д}}{R_{д}} \times 100\%,$$

где R_n – номинальное сопротивление, $R_{д}$ – действительное.

У **серийных образцовых** сопротивлений $\gamma = 0,01\%$ (0,1% -второй класс), у **несерийных образцовых** сопротивлений $\gamma = 0,0001\%$.

Требования, предъявляемые к образцовым сопротивлениям:

- постоянство сопротивления во времени;
- независимость от температуры;
- малая термо - ЭДС в паре с медью;
- малые габариты и размеры.

Таким требованиям удовлетворяют металлы манганин и константан. При включении катушки сопротивления в цепь переменного тока появляется реактивное сопротивление за счет индуктивности обмотки L и собственной емкости катушки C . Полное сопротивление катушки становится комплексным. Для уменьшения влияния частоты переменного тока на это сопротивление катушка должна быть безреактивной. Для уменьшения L и C применяют различные виды намоток: унифилярная намотка, бифилярная намотка, бифилярная секционированная намотка.

Мера электродвижущей силы (ЭДС) представляет собой нормальные элементы (электрохимические элементы), составные части которых строго нормированы. Положительным электродом элемента является ртуть, отрицательным – амальгама кадмия, электролит – водный раствор сернокислого кадмия. Нормальные элементы выпускаются в деревянных или пластмассовых кожухах, их нельзя опрокидывать, встряхивать, подвергать нагреву и сильному освещению.

Нормальные элементы бывают двух типов:

- с насыщенным раствором $CdSO_4$ (кристаллы есть), ЭДС более стабильна (дрейф напряжения 1 мкВ/год), но велико внутреннее сопротивление $R_{вн}=1\text{кОм}$, высокий температурный коэффициент, требует

- термостабилизации (масляный или воздушный термостат при $t=20$);
- с ненасыщенным раствором CdSO_4 (кристаллов нет), ЭДС менее стабильна, но $R_{\text{вн}}=0.3\text{кОм}$.

Максимально допустимый ток $I_{\text{нэmax}}=10^{-6}\text{А}$, чтобы не разрушить элемент. Эталон вольта состоит из 20-ти нормальных насыщенных элементов и компаратора.

Образцовые меры индуктивности изготавливают в виде катушек, намотанных изолированным проводом или высокочастотным обмоточным проводом (многожильный провод – литцендрат) на фарфоровый или керамический каркас. Катушка индуктивности имеет собственную емкость и активное сопротивление. Активное сопротивление катушки составляет доли Ома, и добротность катушки значительна. Катушка индуктивности всегда представляет собой колебательный контур с резонансной частотой, определяющейся значением индуктивности и емкости (паразитной). Откуда следует, что индуктивность катушки, ее сопротивление и добротность зависят от отношения рабочей частоты к собственной резонансной частоте катушки. Для пренебрежения этой зависимостью следует работать на частотах по крайней мере в 10 раз меньше частоты катушки.

Меры переменной индуктивности и взаимной индуктивности выполняются в виде магазинов, состоящих из набора катушек и вариометров (прибор для плавного изменения индуктивности – одна катушка вложена в другую и могут менять свое положение).

Первичный эталон индуктивности – Генри реализован в виде группы из четырех катушек, со средним значением индуктивности группы $0,211570\text{ Гн}$, и мостовой измерительной схемы.

Меры электрической емкости (образцовые конденсаторы) постоянной емкости изготавливают с воздушным или слюдяным диэлектриком. Образцовые конденсаторы переменной емкости – только с воздушным диэлектриком. Образцовые конденсаторы предназначены для работы при высоких напряжениях, заключаются в герметичные кожухи, наполняемые углекислым газом или азотом под давлением 1 МПа. Образцовым конденсаторам предъявляются следующие требования:

- постоянство емкости и малые температурные коэффициенты;
- ничтожно малые потери в диэлектрике;
- независимость емкости от частоты напряжения;
- высокая электрическая прочность диэлектрика;
- малые габариты.

Лучше всего этим требованиям удовлетворяют воздушные конденсаторы, однако воздух имеет малую электрическую прочность, а воздушные конденсаторы – большие габариты. Поэтому при создании образцовых мер емкости предпочли слюдяные конденсаторы. Качество конденсатора характеризуется величиной тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ (чем она меньше, тем лучше). Для воздушных конденсаторов – $\operatorname{tg}\delta = 10^{-4}$. Для слюдяных – $\operatorname{tg}\delta \leq 10^{-3}$.

Первичный эталон единицы емкости – Фарада – представляет собой расчетный конденсатор, в котором изменение емкости определено по геометрическим размерам электродов, скорости света и магнитной постоянной.

Методические указания

При изучении этого раздела необходимо усвоить, что понимается под воспроизведением единицы физической величины, передачей размера единицы величины, эталоном, мерой; для чего необходимы поверочные схемы; чем отличается поверка от калибровки; что собой представляют эталоны основных единиц физических величин системы СИ, каковы их основные характеристики; каковы перспективы создания эталонов.

Литература: [2. с.43-45, 86,91]; [3. с.86-106]; [5. с. 28-30]; [6. с.13-15].

Вопросы для самопроверки

1. Что такое воспроизведение единицы физической величины?
2. Что такое эталон? По каким признакам классифицируют эталоны?
3. Что такое передача размера единицы величины? Как называется процедура передачи размера единицы?
4. Основные характерные признаки для первичных эталонов.
5. Основные характерные признаки для вторичных эталонов. Их назначение.

6. Что входит в эталонную базу РФ?
7. Что такое поверка средств измерений? Какие средства измерений подвергаются поверке? Какие виды поверок Вы знаете?
8. Что такое поверочные схемы? Изобразите Государственную поверочную схему для СИ.
9. Что такое калибровка?
10. Дайте определение для основных и дополнительных единиц системы СИ.
11. Что представляет собой эталон единицы массы, времени, температуры, силы света, количества вещества, силы тока?
12. Назовите основные характеристики образцовых мер?
13. Что представляет собой эталон Ома?
14. Перечислите способы уменьшения паразитных емкостей и индуктивностей для образцовых сопротивлений.
15. Что представляет собой эталон индуктивности и взаимной индуктивности, емкости? Почему его характеристики зависят от частоты?

2.1.4 Основы теории измерений.

Основной постулат метрологии. Аксиомы теории измерений

Измерением можно назвать процесс взаимодействия прибора с изучаемым объектом, результатом которого является получение некоторой информации о свойствах объекта. Этот процесс протекает в пространстве и времени и является объективным процессом.

Процедура сравнения неизвестного размера с известным и выражение первого через второй в кратном или дольном отношении математически записывается в следующем виде:

$$\frac{Q}{[Q]} = x, \quad (2)$$

где в качестве известного размера $[Q]$ при измерении ФВ выступает соответствующая единица СИ. Информация о ней заложена либо в значении вещественной меры, либо в разметке шкалы отсчетного устройства и др. Уравнение (2) называется **уравнением измерения**. Оно выражает некоторое

действие, процедуру сравнения, которая собственно и является измерением. Особенность в том, что при многократном измерении одной и той же ФВ постоянного размера результат сравнения x , называемый *отсчетом* по шкале отношений, получается все время разным. Это отличает практическую деятельность от теоретической модели

$$\frac{Q}{[Q]} = q.$$

Громадный опыт практических измерений, накопленный к настоящему времени, показывает, что $x \neq q$. Теоретически отношения двух размеров q должно быть вполне определенным неслучайным числом. Практически сравнение этих размеров между собой происходит в условиях влияния множества случайных и неслучайных обстоятельств, точный учет которых невозможен. Поэтому результаты сравнения отличаются друг от друга. Это положение, установленное практикой, формулируется в виде аксиомы, которую можно назвать **основным постулатом метрологии: отсчет является случайным числом.** Отсюда следует, что хотя значение измеряемой ФВ существует, определить его невозможно. Это есть противоречие, на разрешении которого основывается прогресс в области измерений.

Для установления системы исходных положений теории измерений необходим аксиоматический выбор некоторых логических начал (исходных понятий). Истинность этих понятий не может быть логически обоснована сама по себе, а устанавливается лишь опытной проверкой всей системы результатов построенной на них теории. Для понимания сущности измерения исходными понятиями являются понятия однородных величин, натурального ряда однородных величин, шкалы реперов, функциональной шкалы и измерительного преобразования.

Различные предметы могут сравниваться между собой лишь по однородным свойствам. При этом под однородными свойствами и характеризующими их величинами мы понимаем лишь такие, которые могут быть сопоставлены между собой по признаку “больше - меньше“ и расположены в

последовательный натуральный ряд, составленный так, что каждая из входящих в него величин будет больше всех предыдущих и меньше всех последующих.

Следует различать искомую ФВ (исследуемое свойство объекта) и измеряемую ФВ, которая связана с исходной величиной в рамках некоторой теоретической модели. Сформулируем некоторые аксиомы теории измерений.

Первая аксиома: без априорной информации измерение невозможно.

Первая аксиома метрологии относится к ситуации перед измерением и говорит о том, что если об интересующем нас свойстве мы ничего не знаем, то ничего и не узнаем. С другой стороны, если о нем известно все, то измерение не нужно. Таким образом, измерение обусловлено дефицитом количественной информации о том или ином свойстве объекта или явления и направлено на его уменьшение. Наличие априорной информации о любом размере выражается в том, что его значение не может быть равновероятным в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, то есть мы знаем функцию распределения ФВ.

Вторая аксиома: измерение есть ни что иное как сравнение.

Вторая аксиома метрологии относится к процедуре измерения и говорит о том, что нет иного экспериментального способа получения информации о каких бы то ни было размерах, кроме как путем сравнения их между собой.

Третья аксиома: результат измерения без округления является случайным.

Третья аксиома метрологии относится к ситуации после измерения и отражает тот факт, что на результат реальной измерительной процедуры всегда оказывает влияние множество разнообразных, в том числе случайных факторов, точный учет которых в принципе невозможен, а окончательный итог непредсказуем. Вследствие этого, как показывает практика, при повторных измерениях одного и того же постоянного размера, либо при одновременном измерении его разными лицами, разными методами и средствами получаются неодинаковые результаты, если только не производить их округления (огрубления). Это отдельные значения случайного по своей природе результата измерения.

Четвертая аксиома: Измеряемая величина во время акта измерения постоянна.

Измерительные шкалы

Величины оценивают при помощи шкал. Шкалой называют множество объектов, множество чисел и такое правило отображения объектов в числа, которое переносит отношения между объектами на отношения между числами.

Шкала величины - упорядоченная последовательность ее значений, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений.

Предпосылкой для возможности производства измерения ФВ является выбор некоторых из этих значений в качестве отправных (по- французски реперных) точек. Совокупность их образует некоторую “лестницу“ или шкалу возможных значений измеряемой величины.

В соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал измерений.

Шкалы наименований (шкалы классификации). Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности. Эти свойства нельзя считать ФВ, поэтому шкалы такого вида не являются шкалами ФВ. Это самый простой тип шкал, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен. В этом случае, чаще всего, отнесение отражаемого свойства к тому или иному классу эквивалентности осуществляется с помощью органов чувств человека. Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу - не приписывай одну и ту же цифру разным объектам. Числа могут быть использованы только для определения вероятности или частоты появления данного объекта, но их нельзя применять для суммирования и пр. В этом случае отсутствует понятие нуля, больше, меньше и единицы измерения. Пример шкалы - атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета.

Шкала порядка (шкала рангов) представляет собой *ранжированный ряд* - упорядоченную последовательность размеров $Q_1 < Q_2 < Q_3 < \dots < Q_j < \dots$, каждый из которых больше предыдущего, хотя сами размеры неизвестны. Если есть возможность опытным путем сравнить интересующий нас размер Q_j с одним из

членов ранжированного ряда Q_i , то экспериментальное решение неравенств $Q_i < Q_j$, $Q_i > Q_j$ можно рассматривать как результат измерения, дающий некоторую количественную информацию о Q_i . Решение о том, что i -ый размер меньше j -го либо больше или равен ему, носит случайный характер, т.е. выполняется с той или иной вероятностью, зависящей от силы неравенств. Решение (результат измерения) может оказаться ошибочным. При $Q_i \gg Q_j$ или $Q_i \ll Q_j$ вероятностью ошибки можно пренебречь. При $Q_i \geq Q_j$, $Q_i \leq Q_j$ и $Q_i \approx Q_j$ с вероятностями ошибок нужно считаться.

После двух или более измерений, то есть после сравнения Q_i с несколькими членами ранжированного ряда, измерительная информация на шкале порядка может быть представлена в виде:

$$Q_i = Q_j \dots Q_{j+1}.$$

Опорным (реперным) точкам $J= 0,1,2,3\dots$ на шкалах порядка принято ставить в соответствие баллы. С таким же успехом можно использовать буквенные обозначения или другие символы. Особенностью реперных шкал является то, что размеры Q_j , образующие ранжированный ряд, как и интервалы между ними, неизвестны. Поэтому баллы ни складывать, ни вычитать, ни умножать, ни делить нельзя. На шкалах порядка не определены никакие математические операции, но определены логические операции.

Определение значения величин при помощи шкал порядка нельзя считать измерением, т.к. на них нет единиц измерения. Примером шкал порядка могут быть международная сейсмическая шкала MSK-64 для измерения силы землетрясений или шкала Бофорта для измерения силы ветра. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать **оцениванием**. Оно неоднозначно и весьма условно.

Шкала интервалов (шкала разностей) служит для представления результатов измерений, полученных посредством экспериментального сравнения i -го размера с j -ым по правилу

$$Q_i - Q_j = \Delta Q.$$

Сами размеры Q_i и Q_j остаются при этом неизвестными. Ноль на шкале интервалов не определен и зависит от выбора размера, с которым производится

сравнение. Вследствие этого, по шкале интервалов можно установить, на сколько один размер больше другого, но нельзя сказать во сколько раз. По шкалам интервалов измеряются время, расстояние (если не известно начало пути), температура и многое другое. На градуированных шкалах интервалов откладываются не размеры ΔQ_i , а значения ΔQ_i , интервалов.

Шкалу интервалов величины Q можно представить в виде уравнения $Q=Q_0+g[Q]$, где g - числовое значение величины, Q_0 - начало отсчета шкалы, $[Q]$ - единица рассматриваемой величины. Такая шкала полностью определяется заданием начала отсчета шкалы и единицы данной величины.

Шкала отношений служит для представления результатов измерений, полученных посредством экспериментального сравнения неизвестного размера $Q_i = Q$ с размером $Q_j=[Q]$ по правилу $Q/[Q] = q$. В шкалах отношений существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений.

Числовое значение q показывает, во сколько раз измеряемый размер Q больше размера $[Q]$, принятого за единицу измерения, или на сколько единиц он больше нуля. На градуированных шкалах отношений откладываются не числовые значения q , а значения $Q=q[Q]$ размеров Q . Градуированная шкала интервалов переходит в градуированную шкалу отношений при $Q_j \rightarrow 0; \Delta Q \rightarrow Q_i = Q$.

Шкала отношений является самой совершенной и наиболее распространенной из всех измерительных шкал. Это единственная шкала, по которой можно установить значение измеренного размера. На шкале отношений определены любые математические операции, что и позволяет вносить в показания, нанесенные на шкалу, мультипликативные и аддитивные поправки.

Абсолютные шкалы. Под абсолютными понимают шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеющие естественное однозначное определение единицы измерения и не зависящее от принятой системы единиц измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам - коэффициент усиления, ослабления и другие.

При изучении этого раздела необходимо усвоить, какой смысл заложен в аксиомах метрологии, какие бывают шкалы, их особенности, примеры разных видов шкал.

Литература: [2. с.11-13]; [3. с.229-234].

Вопросы для самопроверки

1. Приведите уравнение измерения. Поясните, что оно выражает?
1. Сформулируйте основной постулат метрологии? Поясните его смысл.
2. Какие аксиомы метрологии Вам известны?
3. Что такое шкала измерений? Какие типы шкал Вы знаете?
4. Что такое шкала наименований, порядка, интервалов (разностей) отношений?

Что такое абсолютные шкалы и условные шкалы? Приведите примеры.

2.2. МЕТОДЫ И ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ.

Для того, чтобы можно было провести измерение и достичь поставленную цель, необходимо сформулировать измерительную задачу, в которую должны войти следующие **составляющие элементы** измерений:

- **объект измерения**, т.е. измеряемая величина;
- **единица измерения**, с которой сравнивается эта величина;
- **средство измерений**, выбор которого должен быть оптимальным для достижения требуемого результата измерений;
- **результат измерения**, представляющий, как правило, именованное число, например, метр, грамм;
- **точность измерений**, которая, как правило, задается при постановке измерительной задачи.

В зависимости от рода измеряемой величины, условий проведения измерений и приемов обработки экспериментальных данных измерения могут классифицироваться с различных точек зрения и по различным признакам (см. рис 3).

По способу получения измерительной информации (результатов) они разделены на четыре класса:

- прямые;
- косвенные;
- совокупные;
- совместные.

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение получают непосредственно. При этом измеряемую величину сравнивают с мерой измерительными приборами, градуированными в требуемых единицах. При проведении этих измерений не требуется каких-либо вычислений. Например, измерение длины детали линейкой или напряжения вольтметром, силы тока амперметром.

Косвенное измерение – определение искомого значения величины на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной. Косвенные измерения широко распространены, когда искомую величину невозможно или сложно измерить непосредственно или когда прямое измерение дает менее точный результат. Результат измерений находят из решения уравнения, выражающего зависимость между измеряемой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Например, вычисление затухания, вносимого четырехполюсником, по измеренным значениям входного и выходного напряжений; определение объема цилиндра по результатам измерений его диаметра и высоты.

Косвенное измерение можно выразить уравнением

$$Y = f(x, y, z \dots w),$$

где Y – измеряемая величина; $x, y, z \dots w$ - величины, размер которых определяется по результатам прямых измерений.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при котором искомые значения величин

определяют путем решения системы уравнений, получаемых при прямых измерениях этих величин в различных сочетаниях. Примером совокупных измерений являются измерения, когда значение массы отдельных гирь из набора определяют по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений масс различных сочетаний гирь или определение значений сопротивлений между вершинами треугольника.

Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Примером совместных измерений является измерение, при котором электрическое сопротивление резистора при температуре 20°C и его температурные коэффициенты находят по данным прямых измерений сопротивления и температуры, выполненных при разных температурах.

По характеру представления результатов измерений: различают абсолютные и относительные.

Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Например, измерение силы тока в амперах (А), силы $F = mg$ основано на измерении основной величины – массы m 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. Например, измерение коэффициента отражения в линии, коэффициента полезного действия, относительной влажности.

По форме представления результатов различают аналоговые и цифровые.

Для аналоговых измерений характерно непрерывное преобразование физической величины средством измерения. Результат – перемещение стрелки прибора по шкале. Точность таких измерений мала из-за геометрических особенностей указателей и шкалы, а также из-за субъективных ошибок оператора.

При цифровых измерениях в измерительном приборе происходит сравнение физической величины с рядом образцовых значений. Результатом измерений является число. Субъективные ошибки исключены. Точность определяется только классом прибора.

По характеру изменения измеряемой величины в процессе измерений они делятся на статические и динамические.

При **статических измерениях** выходной сигнал постоянен (или меняется так медленно, что каждый результат измерений может быть выражен только одним числом) в течение его измерения.

При **динамических измерениях** результатом является функциональная зависимость измеряемой физической величины от времени. Динамические измерения могут быть непрерывными, когда технические средства позволяют непрерывно следить за измеряемой величиной, и дискретными, когда значения измеряемой величины фиксируются в определенные моменты времени.

По количеству измеряемой информации (числу измерений) одной и той же величины измерения делятся на однократные и многократные.

Однократное – измерение, выполненное один раз. Во многих случаях на практике выполняются именно такие измерения.

Многократное измерение – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, то есть состоящее из ряда однократных измерений. Многократные измерения проводят с целью уменьшения случайной составляющей погрешности измерений. От числа измерений зависит методика обработки экспериментальных данных. При многократных наблюдениях для получения результата измерений приходится прибегать к статистической обработке результатов наблюдений.

По условиям измерений различают равноточные и неравноточные измерения.

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

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

По метрологическому назначению измерения делятся на технические, которые проводятся при помощи рабочих средств измерения, и метрологические – измерения при помощи эталонов с целью воспроизведения единиц физических величин, или передачи их размера рабочим средствам измерения (см. рис.1).

Существуют и другие классификации измерений, например, по связи с объектом (контактные и бесконтактные), по степени достаточности измерений (необходимые и избыточные) и другие.

По принципу и методу измерений различают методы непосредственной оценки, сравнения с мерой, замещения.

Принцип измерений – физическое явление или эффект, положенное в основу измерения. Например, использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием.

Метод измерений – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. Как правило, метод измерений обусловлен устройством средств измерений (рис.4).

Методы измерений делятся на две большие группы: методы непосредственной оценки, методы сравнения с мерой.

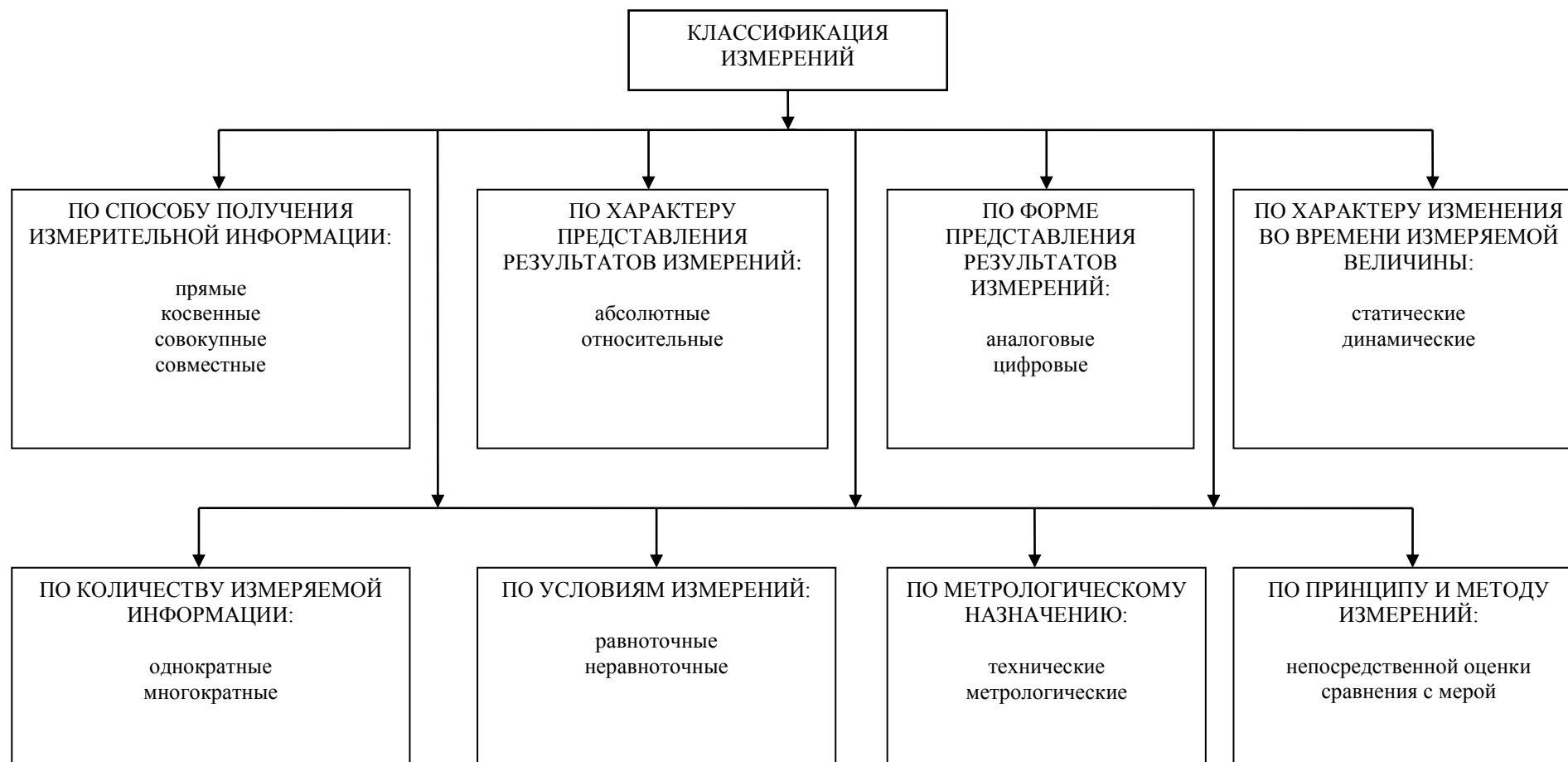


Рис. 3 –Классификация измерений

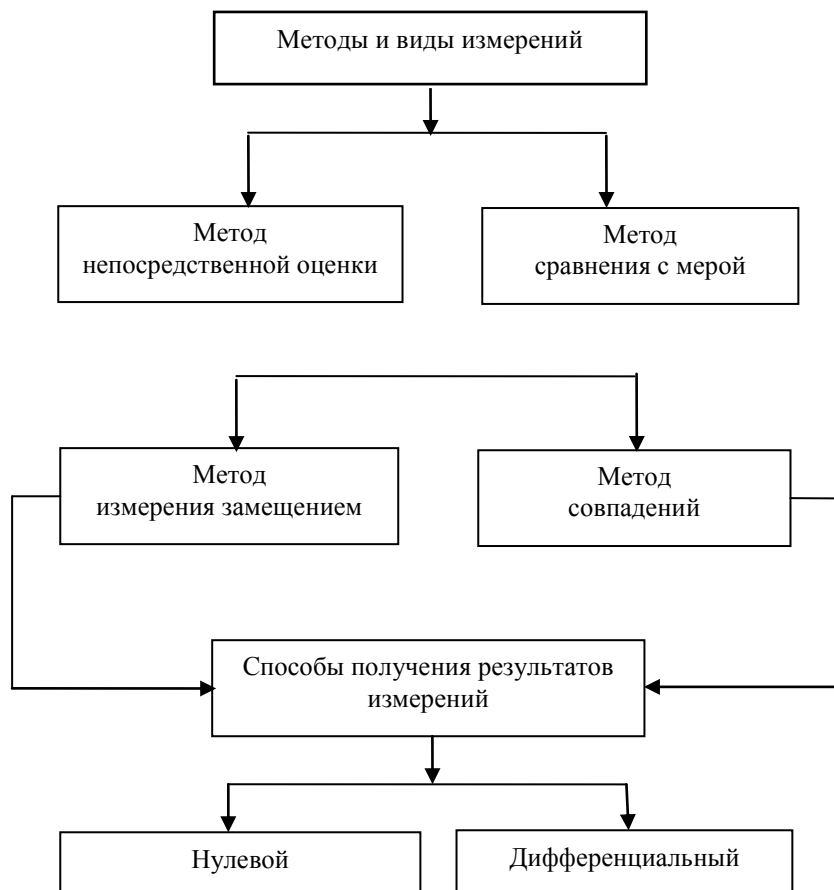


Рис. 4 – Классификация методов измерений

Метод непосредственной оценки – метод, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений. Например, взвешивание на циферблатных весах или измерение давления пружинным манометром, тока амперметром и др.

Метод сравнения с мерой – это метод измерений, в котором с помощью компаратора производится сравнение размера измеряемой величины с размером величины, воспроизводимым мерой, которая представляет собой конструктивно законченное, самостоятельное средство измерения, имеющее (если мера многозначная) отсчетное устройство, проградуированное в значениях измеряемой величины. Результаты измерения находятся по отсчетному устройству меры и компаратора (если производится неполное уравнивание).

В зависимости от того, какая физическая величина измеряется и какие приборы сравнения используются, могут быть реализованы различные разновидности этого метода, рассматриваемые ниже.

Метод измерения *замещением* – это метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Например, при взвешивании поочередным помещением массы и гирь на одну и ту же чашку весов или при измерении электрических сопротивлений, емкостей, индуктивностей при помощи мостов.

Метод совпадений - это метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Например, при измерении частоты периодических сигналов с помощью осциллографических индикаторов.

Результат измерения для всех реализаций метода сравнения с мерой может быть получен двумя способами.

1. Регулируют (настраивают меру таким образом, чтобы обеспечить равенство размеров измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, то есть добиваются нулевого показания прибора сравнения). Отсчет значения измеряемой величины производят по отсчетному устройству меры.

2. Устанавливают дискретное значение воспроизводимой мерой величины, близкое к измеряемой. Значение измеряемой величины определяется как алгебраическая сумма показаний сравнивающего прибора и эталонной меры.

В первом случае метод сравнения называют нулевым, во втором – дифференциальным.

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Например, измерение массы на равноплечих весах при помощи гирь. Измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием. Принадлежит к числу очень точных методов.

Дифференциальный метод – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Этот метод может дать очень точные результаты. Так, если разность составляет 0,1 % измеряемой величины и оценивается прибором с точностью до 1 %, то точность измерения искомой величины составит уже 0,001 %.

Методы непосредственной оценки и сравнения с мерой широко используются в практике поверки и калибровки

Методические указания

При изучении этого раздела необходимо усвоить классификацию методов измерений, уметь пояснить, в чем заключается тот или иной вид и метод измерений, привести примеры и схемы.

Литература: [3. с.235-242]; [7. с. 45-51].

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите составляющие измерений.
2. Какие виды и методы измерений Вы знаете? В чем они заключаются?

3. Что общего и различного у косвенных, совокупных и совместных измерений?
4. Перечислите достоинства и недостатки метода непосредственной оценки и метода сравнения с мерой.
5. В чем отличие понятия измерение и наблюдение?

2.3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ СВОЙСТВА

Измерения выполняются с помощью технических средств, которые называются *средствами измерений (СИ)*. Разработка СИ является задачей приборостроения. В метрологии СИ рассматриваются с точки зрения их единой классификации и выявления параметров, которые обеспечивают получение результата измерений с заданной точностью.

2.3.1. Понятие и классификация средств измерений

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее или хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменной в течение известного интервала времени.

Все многообразие средств измерений подразделяется на типы и виды.

Тип средств измерений – совокупность СИ одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной технической документации.

Вид средства измерений – совокупность СИ, предназначенных для измерения данной физической величины. Вид средств измерений может включать в себя несколько их типов. Например, амперметр является видом средства измерений для измерения силы тока.

По *метрологическому назначению* средства измерений делятся на меры и рабочие СИ.

Мера физической величины – СИ, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров,

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

Меры, воспроизводящие физические величины лишь одного размера, называются **однозначными** (гиря 1 кг), нескольких размеров – **многозначные** (миллиметровая линейка) Кроме того, существуют наборы мер и магазины мер.

При измерениях с использованием мер сравнивают измеряемые величины с известными величинами, воспроизводимыми мерами. Сравнение осуществляется разными путями. Наиболее распространенным средством сравнения является **компаратор**, предназначенный для сличения мер однородных величин.

К мерам относятся **стандартные образцы и образцовое вещество**, которые представляют собой специально оформленные тела или пробы вещества определенного и строго регламентированного содержания, одно из свойств которых является величиной с известным значением. Например, образцы твердости, шероховатости.

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

К рабочим СИ относятся измерительные преобразователи, приборы, установки и системы, измерительно-вычислительные комплексы, измерительные принадлежности.

Измерительный преобразователь (ИП) – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, индикации или передачи. ИП, как правило, не имеют устройств отображения измерительной информации, они или входят в состав какого-либо измерительного прибора, или применяются вместе с каким-либо средством измерений для непосредственного восприятия наблюдателем. Преобразуемая величина, поступающая на измерительный преобразователь, называется **входной**, а результат преобразования – **выходной** величиной. Соотношение между ними задается **функцией преобразования**, которая является его основной метрологической характеристикой.

По месту в измерительной цепи различают первичные и промежуточные преобразователи.

Для непосредственного воспроизведения измеряемой величины служат **первичные преобразователи**, на которые непосредственно воздействует измеряемая величина и в которых происходит трансформация измеряемой величины для ее дальнейшего преобразования или индикации. Примером первичного преобразователя является термопара в цепи термоэлектрического термометра. Одним из видов первичного преобразователя является **датчик** – конструктивно обособленный первичный преобразователь (без отсчетного устройства), от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию). Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы. Например, датчик метеорологического зонда. В области измерений ионизирующих излучений датчиком часто называют детектор. Рабочее средство измерений может использоваться и в качестве индикатора.

Индикатор – техническое средство или вещество, предназначенное для установления наличия какой-либо физической величины или превышения уровня ее порогового значения. Индикатор не имеет нормированных метрологических характеристик. Примерами индикаторов являются осциллограф, лакмусовая бумага и т.д.

По характеру преобразования ИП могут быть аналоговыми, аналого-цифровыми (АЦП), цифро-аналоговыми (ЦАП), то есть, преобразующими цифровой сигнал в аналоговый или наоборот.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Измерительный прибор представляет измерительную информацию в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

По способу индикации различают показывающие и регистрирующие приборы. Регистрация может осуществляться в виде непрерывной записи измеряемой величины или путем печатания показаний прибора в цифровой форме.

По действию – интегрирующие и суммирующие, приборы прямого действия, приборы сравнения, аналоговые и цифровые приборы, самопишущие и печатающие.

Приборы прямого действия отображают измеряемую величину на показывающем устройстве, имеющем градуировку в единицах этой величины. Например, амперметры, термометры.

Приборы сравнения – средства измерения, посредством которых возможно выполнить сравнение мер однородных величин или показания измерительных приборов. Такие приборы используются для измерений с большей точностью (например, рычажные весы, градуировочные жидкости).

По действию измерительные приборы разделяют на интегрирующие и суммирующие, аналоговые и цифровые, самопишущие и печатающие.

Измерительная установка и система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких величин и расположенная в одном месте (установка) или в разных местах объекта измерений (система). Измерительные системы, как правило, являются автоматизированными и по существу они обеспечивают автоматизацию процессов измерения, обработки и представления результатов измерений.

Измерительную установку, применяемую для поверки, называют поверочной установкой, а входящую в состав эталона – эталонной.

Измерительно-вычислительный комплекс – функционально объединенная совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Измерительные принадлежности – вспомогательные устройства, служащие для обеспечения операций измерений, передачи измерительной информации на расстояние, обработки результатов (например, источники питания, коммутаторы, термостаты и т.п.). Измерительные принадлежности могут вносить в результат измерений погрешности, которые необходимо учитывать.

Классификация средств измерений проводится и по другим различным признакам. Например, по видам измеряемых величин, по виду шкалы (с равномерной или неравномерной шкалой), по связи с объектом измерения (контактные или бесконтактные).

Методические указания

При изучении этого раздела необходимо знать классификацию средств измерений, их назначение, особенности всех признаков средств измерения, уметь привести примеры.

Литература: [2. с.29-41]; [3. с.242-244].

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой средство измерений?
2. По каким признакам классифицируются средства измерений?
3. Приведите примеры средств измерений различных физических величин.
4. Что собой представляют измерительные приборы? По каким признакам они классифицируются?
5. Что собой представляет измерительная установка и система?
6. Для каких целей предназначены информационно-измерительные системы?
7. В чем различие меры и измерительного прибора?
8. Для чего используются стандартные образцы?
- 9.

2.3.2. Метрологические характеристики средств измерений. Классы точности средств измерений

Метрологические характеристики средств измерений

Оценка пригодности средств измерений для решения тех или иных измерительных задач проводится путем рассмотрения их метрологических характеристик (МХ). К МХ относятся те, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений.

Метрологическая характеристика – характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерений и его погрешность. МХ позволяют судить

об их пригодности для измерений в известном диапазоне с известной точностью. МХ, устанавливаемые нормативными документами на СИ, называют **нормируемыми** метрологическими характеристиками, а определяемые экспериментально – **действительными**.

Метрологические характеристики позволяют:

- произвести расчет погрешностей измерений, то есть установить точность измерений до проведения самих измерений;
- обеспечить выбор нужного средства измерений по точности и другим метрологическим характеристикам;
- обеспечить взаимозаменяемость средств измерений;
- определить погрешность систем измерения по метрологическим характеристикам средств измерений, входящих в них;
- оценить техническое состояние средств измерений при поверке.

Для каждого типа СИ устанавливаются свои МХ. Выделяют несколько групп метрологических характеристик.

1. Характеристики средств измерений, предназначенные для определения результатов измерений:

- **цена деления шкалы** измерительного прибора или многозначной меры – разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Это величина обратная чувствительности;
- **вид выходного кода**, число разрядов кода, цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом виде;
- **диапазон измерений** – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИ. Для мер это их номинальное значение, для преобразователей — диапазон преобразования. Различают **нижний и верхний** пределы измерений, которые выражаются значениями величины, ограничивающими диапазон измерений снизу и сверху;
- **разрешающая способность** – наименьшее различимое изменение измеряемой величины. Имеет размерность измеряемой величины, определяется

уровнем внутренних шумов и нестабильностью элементов, у цифровых приборов равна цене единицы младшего разряда;

- **Функция преобразования средства измерения** (градуировочная характеристика, уравнение преобразования) – зависимость между выходным сигналом средства измерения y и его входным сигналом x . Она может быть представлена аналитически, графически или в виде таблиц. Она связывает конструктивные параметры средства измерения с величинами x и y . Зависимость выходной величины средства измерений от входной в установившемся режиме работы называется **статической характеристикой**. Для приборов наилучшей является линейная статическая характеристика $y = kx + a$, где a – постоянная; k – передаточный коэффициент, причем среди линейных статических характеристик более предпочтительны характеристики, для которых $a = 0$, т.е. $y=kx$. Самой желательной статической характеристикой прибора является $y=x$, получаемая при коэффициенте передачи $k = 1$. В этом случае искомое значение физической величины отсчитывают непосредственно по шкале прибора.

2. Характеристики погрешностей средств измерений. С их помощью обеспечивается контроль за качеством работы средств измерений, гарантируется точность (достоверность) результатов измерений.

Погрешность СИ – разность между показаниями СИ и истинными (действительными) значениями ФВ. Погрешности являются характеристиками стабильности параметров преобразования в нормальных условиях эксплуатации средств измерений. Предусматривается разделение погрешностей на систематические и случайные погрешности и нормирование как пределов допускаемых погрешностей, так и пределов СКО указанных составляющих.

3. Характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам (температура, влажность, давление) и неинформативным параметрам. Неинформативным называется параметр входного сигнала средства измерения, не связанный функционально с измеряемым параметром. По условиям применения СИ различают нормальные и рабочие условия. Нормальные – условия, для которых нормируются основные погрешности средств измерений. При этом

влияющие величины и неинформативные параметры входного сигнала имеют нормальные значения.

К характеристикам чувствительности относятся

- **Функция влияния** – зависимость изменения метрологической характеристики от изменения влияющей величины или неинформативного параметра входного сигнала в пределах рабочих условий эксплуатации. Она может задаваться в виде формулы, графика, таблицы;

- **Чувствительность** – определяется из уравнения преобразования $S=\Delta y/\Delta x$ и представляет собой отношение изменения сигнала на выходе прибора Δy к вызывающему его изменению сигнала на входе прибора Δx .

Для стрелочных приборов имеет вид

$$S = dy/dx,$$

где dl – перемещение конца стрелки, dx - изменение измеряемой величины.

Для равномерных шкал

$$S = S_{н\ddot{o}} = const,$$

$$S_{н\ddot{o}} = l/x_N,$$

где l – длина шкалы, x_n - диапазон измерений.

Для неравномерных шкал чувствительность – величина переменная, характеризуется коэффициентом неравномерности шкалы – отношением максимальной чувствительности S^{max} к минимальной S^{min} :

$$J = S^{max}/S^{min}.$$

Чувствительность является мерой, при помощи которой сравнивают приборы для измерения одинаковых физических величин (чем выше чувствительность, тем прибор лучше). Величину, обратную чувствительности, называют постоянной прибора $C=1/S$. Она равна цене деления.

- **Порог чувствительности** – изменение входного сигнала, вызывающее наименьшее изменение выходного сигнала, которое может быть обнаружено наблюдателем.
- **Вариация (гистерезис)** – разность между показаниями средства измерений в данной точке диапазона измерения при возрастании и убывании измерений.

4. Динамические характеристики средств измерений. Отражают инерционные свойства средств измерения. Позволяют по данным о входном сигнале рассчитать динамические составляющие погрешностей результата измерений (полные динамические характеристики), либо определить допустимость использования данного средства измерения (частные характеристики). К полным динамическим характеристикам относятся.

- Дифференциальное уравнение, решение которого позволяет оценивать динамическую погрешность и получить исправленный результат измерений, если известны его коэффициенты.
- Передаточная функция $K(p) = y(p)/x(p)$ – отношение изображения выходной величины динамической системы $y(p)$ к изображению входной величины $x(p)$.
- Переходная характеристика – отклик средства измерения на ступенчатое возмущение единичной высоты.
- Импульсная переходная характеристика - реакция средства измерения на воздействие дельта - функции.

К частным динамическим характеристикам относятся время реакции, постоянная времени, амплитудно-частотная характеристика и другие.

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

Нормирование метрологических характеристик

Метрологические характеристики, присущие данному средству измерений, определяются только в случае образцовых средств измерений. Для рабочих СИ информация об их метрологических характеристиках содержится в нормах, которые устанавливаются в нормативно-технических документах для совокупности приборов данного типа.

СИ можно использовать только тогда, когда известны их МХ. Обычно указываются **номинальные значения** параметров средств измерений и допускаемые отклонения от них. Как правило, реальные метрологические

характеристики имеют отклонения от их номинальных значений. Поэтому устанавливают границы для отклонений реальных метрологических характеристик от номинальных значений – нормируют их. Нормирование МХ СИ позволяет избежать произвольного установления их характеристик разработчиками и делает эти средства взаимозаменяемыми.

К НМХ относят также номинальное значение однозначной меры, характеристики систематической и случайной составляющих погрешности средства измерений, вид выходного кода, область рабочих частот, быстродействие, надежность средств измерений и пр. Для средств измерений устанавливаются нормальные и рабочие условия применения.

Нормальные условия: температура воздуха $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$, относительная влажность $(65\pm 15)\%$, атмосферное давление $(100\pm 4)\text{кПа}$, напряжение питающей сети $(220\pm 4)\text{В}$, частота питающей сети $(50\pm 1)\text{Гц}$. Рабочие условия характеризуются рабочей областью значений влияющих величин (7 групп), например температура для различных групп лежит в пределах $(+10\dots -70)^{\circ}\text{C}$.

Для средств измерений отдельно нормируется погрешность в нормальных условиях применения (основная) и погрешности (дополнительные), имеющие место при выходе влияющих величин за пределы нормальной области, но остающихся в пределах рабочей области (раздел 2.2.1.). Дополнительная погрешность имеет такой же вид, что и основная (абсолютная, приведенная, относительная). Дополнительные погрешности, вызванные различными влияющими факторами, должны нормироваться отдельно.

В общем виде суммарная абсолютная погрешность СИ при влияющих факторах

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_0 + \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2},$$

где Δ_0 – основная погрешность СИ, Δ_i – дополнительная погрешность, вызванная изменением i – го влияющего фактора.

Нормирование погрешностей СИ

Одной из важнейших метрологических характеристик СИ является их погрешность, знание которой необходимо для оценивания погрешности измерения.

Кроме погрешности СИ суммарную погрешность составляют также погрешности метода измерений и оператора, проводящего измерения.

Погрешности СИ могут быть обусловлены различными причинами. Погрешности конкретных экземпляров средств измерений устанавливаются только для эталонов. Для остальных средств измерений вся информация об их погрешностях представляет собой те нормы, которые для них установлены.

В основе нормирования погрешностей СИ лежат следующие основные положения.

1. В качестве норм указывают пределы допускаемых погрешностей, включающие в себя систематические и случайные составляющие.

Под **пределом допускаемой погрешности** понимается наибольшее значение погрешности СИ, при котором оно еще признается годным к применению. Данная норма отражает то положение, что средства измерений можно применять с однократным считыванием показаний.

2. Порозы нормируют все свойства СИ, влияющие на их точность: отдельно нормируют основную погрешность, по отдельности – все дополнительные погрешности и другие свойства, влияющие на точность измерений. При выполнении данного требования обеспечивается максимальная однородность средств измерений одного типа, то есть близкие значения дополнительных погрешностей, обусловленных одними и теми же факторами. Это дает возможность заменять один прибор другим однотипным без возможного увеличения суммарной погрешности.

Пределы допускаемых погрешностей средств измерения применяются для абсолютной, относительной погрешности и приведенной погрешностей. В зависимости от вида взаимодействия с входным сигналом они могут быть аддитивными и мультипликативными.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности выражаются следующим образом.

1. При чисто аддитивной погрешности полоса погрешностей остается неизменной для любых значений измеряемой величины x

$$\Delta = \pm a.$$

2. При мультипликативной погрешности полоса погрешности увеличивается в зависимости от x

$$\Delta = \pm bx.$$

3. При одновременном присутствии аддитивной и мультипликативной составляющих полоса погрешностей имеет трапецеидальную форму. Текущее значение абсолютной погрешности Δ в функции измеряемой величины x описывается соотношением

$$\Delta = \pm (a + bx),$$

где x – показание измерительного прибора, a и b – положительные числа, не зависящие от x .

4. В виде функции $\Delta = f(x)$, графика, таблицы при неравномерном изменении погрешности в зависимости от входного сигнала. Выражается в абсолютных единицах физической величины.

Если мультипликативная погрешность преобладает над аддитивной, то нормируется предел допускаемой относительной погрешности, так как последняя (относительная погрешность) будет постоянной по диапазону измерений и выражается одним числом

$$\delta = \Delta / x = \pm q,$$

где q – отвлеченное положительное число.

Для аддитивной и мультипликативной погрешности формула имеет вид:

$$\delta = \Delta / x = \pm \left[c + d \left(\frac{x_k}{x} - 1 \right) \right],$$

где x_k – конечное значение диапазона измерений прибора; c и d – относительные величины.

Первое слагаемое в этой формуле имеет смысл относительной погрешности при $x = x_k$, второе — характеризует рост относительной погрешности при уменьшении показаний прибора.

Пределы допускаемой приведенной погрешности (в процентах) следует устанавливать по формуле

$$\gamma = 100\Delta / x_N = \pm p$$

где x_N — нормирующее значение; p — отвлеченное положительное число из ряда 1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6, умноженное на 10^n ($n = 1, 0, -1, -2$ и так далее)

Нормирующее значение принимается равным

- конечному значению рабочей части шкалы $x_N = x_k$, когда нулевая отметка находится на краю или вне рабочей части шкалы (равномерная шкала);
- арифметической сумме значений рабочей части шкалы, когда нулевая отметка находится внутри шкалы;
- длине шкалы, если она существенно неравномерна. В этом случае, поскольку длина выражается в миллиметрах, то абсолютную погрешность надо выразить также в миллиметрах;
- номинальному значению x , если средство измерений предназначено для измерений отклонения измеряемой величины от номинального значения.

Все перечисленные причины появления погрешностей приводят к тому, что многократно снятые характеристики прибора или серии однотипных приборов занимают на графике некоторую полосу — полосу погрешностей. Некоторая детерминированная средняя линия этой полосы принимается за номинальную характеристику прибора, указывается в паспорте и используется для определения результатов измерения. Отсюда погрешность данного измерительного прибора есть разность между реальной и номинальной его характеристикой, то есть не число, а функция измеряемой величины.

Кроме этого ГОСТ разрешает использовать для некоторых средств измерений специальные формулы нормирования погрешностей.

Классы точности средств измерений

Класс точности – это обобщенная характеристика средства измерений, выражаемая пределами допускаемых значений его основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности не является непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этим средством измерений, поскольку погрешность зависит еще от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т.д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность средства измерений данного типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств.

Государственными стандартами для разных приборов установлены различные классы точности, которые обычно указывают на шкале или корпусе прибора. СИ может иметь два и более класса точности.

Существует несколько способов задания классов точности приборов.

1 способ используется для так называемых *мер*. При этом способе указывается порядковый номер класса точности меры. Порядок вычисления погрешностей в этом случае определяют по технической документации, прилагаемой к мере. Не всегда число, обозначающее класс точности, показывает предел допускаемой погрешности.

2 способ предусматривает задание класса точности для приборов с преобладающими аддитивными погрешностями. В этом случае класс точности задается в виде числа K (без кружочка). При этом нормируется основная приведенная погрешность γx прибора, выраженная в процентах, которая во всех точках шкалы не должна превышать по модулю числа K , то есть $|\gamma x| \leq K, \%$. Число K выбирается из ряда значений (1,0; 1,5; 2; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0), умноженного на 10^n , где $n = 1, 0, -1, -2 \dots$

3 способ предусматривает задание класса точности для приборов с преобладающими мультипликативными погрешностями. В этом случае нормируется основная относительная погрешность, выраженная в процентах, так

что $|\delta x| \leq K, \%$. Класс точности задается в виде числа K в кружочке K . Число K выбирается из приведенного выше ряда.

4 способ предусматривает задание класса точности для приборов с соизмеримыми аддитивными и мультипликативными погрешностями. В этом случае класс точности задается двумя числами a/b , разделенными косой чертой, причем $a > b$. При этом нормируется основная относительная погрешность, вычисляемая по формуле

$$\delta x \leq [a + b(x_k/x - 1)], \%$$

где x_k – максимальное конечное значение пределов измерений. Число a отвечает за мультипликативную составляющую погрешности, а число b – за аддитивную составляющую погрешности. Значения a и b выбираются из вышеприведенного ряда.

5 способ задания класса точности используется для приборов с резко неравномерной шкалой. Класс точности задается числом K , подчеркнутым галочкой K . В этом случае нормируется основная приведенная погрешность в процентах от длины шкалы.

Примеры обозначение классов точности для различных форм выражения погрешности приведены в табл. 1.

Примечание. Порядок вычисления дополнительных погрешностей измерений обычно приводится в технической документации средств измерений. Понятие класс точности применяется довольно редко. В основном он чаще всего используется для описания характеристик электроизмерительных приборов, аналоговых стрелочных приборов всех типов, некоторых мер длины, весов, гирь общего назначения, манометров.

Таблица 1 - Обозначение классов точности средств измерений

Вид погрешности	Формула	Примеры пределов допускаемой погрешности	Обозначение класса		Примеры средств измерений
			НТД	На СИ	
Абсолютная	$\Delta = \pm a$ $\Delta = \pm(a + bx)$	$\Delta = \pm 0,2A$	Класс точности N или Ш	N Ш	Меры Меры
Относительная	$\delta = \pm \Delta/x \cdot 100\% = A \cdot 10^n = \pm q$	$\delta = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	0,5	Мосты, счетчики, делители, измерительные трансформаторы
	$\delta = \pm a + b(x_k/x - 1)$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01(x_k/x - 1)]$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01	Цифровые СИ, магазины емкостей
Приведенная	$\gamma = \pm \Delta/x_N \cdot 100\% = A \cdot 10^n$	При $x_N = x_k$ $\gamma = \pm 1,5$	Класс точности 1,5	1,5	Аналоговые СИ, если x_N в единицах
		При x_N , равном дине шкалы или ее части, мм $\gamma = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	0,5	Омметры, если x_N определяется длиной шкалы или ее части

2.3.3 Использование СИ

С точки зрения применения в зависимости от решаемой задачи СИ можно разделить на стандартизованные и нестандартизованные.

Стандартизованное СИ – средство измерений, изготовленное и применяемое в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта. Стандартизованные СИ обычно подвергаются испытаниям и вносятся в Государственный реестр.

Нестандартизованное СИ – средства измерений, стандартизация требований к которому признана нецелесообразной. К нестандартизованным обычно относятся узко специализированные средства измерений, изготовленные в единичных экземплярах и не предназначенные для массового производства. Измерительные задачи, решаемые с помощью таких СИ, носят ограниченный и локальный характер. Как правило, такие средства измерений используются на одном или нескольких предприятиях для вспомогательных измерений. Часто они применяются в качестве индикаторов. К понятию стандартизованного средства измерений примыкает понятие узаконенного средства измерений.

Узаконенное СИ – средство измерений, признанное годным и допущенное для применения уполномоченным на то органом.

Возможность или невозможность использования СИ для решения поставленной измерительной задачи характеризуется такими понятиями, как метрологическая исправность и метрологический отказ.

Метрологический отказ СИ – выход метрологической характеристики средства измерений за установленные пределы. Если метрологический отказ произошел из-за технических неполадок, то они должны быть устранены. Если же прибор технически исправен, то в случае метрологического отказа его класс точности должен быть понижен

Состояние СИ, при котором все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям, называется **метрологической исправностью**. Это более узкое понятие, чем понятие «работоспособность». Последнее охватывает все технические характеристики. Таким образом, метрологические отказы, то есть отказы средства измерений,

состоящие в потере его метрологической исправности, составляют лишь часть общего потока отказов.

Стабильность средств измерений определяется свойством средств измерений сохранять неизменными во времени значения метрологические характеристики. Она определяет **метрологическую надежность**, которая, в свою очередь, обуславливает надежность средства измерения в целом.

Надежность – свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя с течением времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам, условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Показатели надежности нормируют для всех без исключения технических изделий, включая средства измерений. Их соответствие установленным нормам контролируют на стадиях разработки, изготовления и эксплуатации изделия.

При оценке метрологической надежности показатель нестабильности средств измерений являются исходными данными для расчета. Эти показатели могут быть определены на этапе проектирования по исходным данным об изменении во времени математического ожидания и дисперсии параметров комплектующих элементов, или оценены экспериментально при проведении испытаний и подконтрольной эксплуатации средств измерений.

Методические указания

После изучения этого раздела необходимо знать назначение МХ, определение этого понятия; какие метрологические характеристики чаще всего встречаются; как нормируются метрологические характеристики; как нормируются приборы по классам точности. Для усвоения материала, касающегося нормирования погрешностей, необходимо предварительно обратиться к разделу 2.5 «Основы теории погрешности», ознакомиться с классификацией погрешностей, источниками их возникновения, а затем вернуться к данному разделу для более детального изучения.

Обратите внимание на материал о метрологической надежности, на отличие метрологического отказа и отказа в широком значении этого понятия.

Литература: [2. с.33-36]; [3. с.244-257]; [4. с. 92-99]; [5. с. 30-32]; [7.с.110]

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятию метрологические характеристики.
2. Какие задачи решаются с помощью метрологических характеристик?
3. На какие группы делят метрологические характеристики?
4. Перечислите наиболее распространенные метрологические характеристики.
5. Для чего нормируют погрешности СИ?
6. Перечислите основные положения, лежащие в основе выбора нормируемых метрологических характеристик.
7. Чем обусловлены погрешности СИ?
8. Что такое основная и дополнительная погрешности? Как они нормируются?
9. Какие метрологические характеристики описывают погрешность средств измерений? Каким образом производится их нормирование?
10. Что такое класс точности СИ?
11. Как нормируются приборы по классам точности при преобладающей аддитивной (мультипликативной) погрешности?
12. Перечислите основные способы задания класса точности СИ.
13. Какие приборы имеют два и более класса точности?
14. Приведите примеры обозначения классов точности.
15. Дайте определение метрологической надежности. В чем ее отличие от эксплуатационной надежности технических средств?
16. Какими характеристиками можно охарактеризовать метрологическую надежность средств измерений?

2.4. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Под метрологическим обеспечением (МО) понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Основной тенденцией в развитии МО является переход от существовавшей ранее сравнительно узкой задачи обеспечения единства и требуемой точности измерений к принципиально новой задаче обеспечения качества измерений. Качество измерений характеризует совокупность свойств СИ, обеспечивающих получение в установленный срок результатов измерений с требуемой точностью (размером допускаемой погрешности), достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью.

Объектом МО являются все стадии жизненного цикла изделия (продукции) или услуги. МО имеет четыре основы: научную, организационную, нормативную и техническую (см. рис 5). Разработка и проведение мероприятий МО возложены на метрологические службы.

Метрология относится к такой сфере деятельности, основные положения которой должны быть закреплены законом, принимаемым в соответствии с законодательством страны. Это связано с тем, что все юридические нормы, направленные на охрану прав и законных интересов потребителей, должны регулироваться законодательными актами, принимаемыми высшим законодательным органом страны. Законодательство в области метрологии должно содействовать экономическому и социальному развитию страны путем защиты от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.



Рис.5 – Основы метрологического обеспечения

Деятельность по метрологическому обеспечению осуществляется в соответствии с:

- Конституцией РФ (ст. 71);
- Законом РФ «Об обеспечении единства измерений»;
- Постановлениями Правительства РФ по отдельным вопросам (направлениям) метрологической деятельности;
- нормативными документами - подзаконные акты, устанавливающие правила, общие принципы или характеристики, касающихся различных видов деятельности или их результатов;
- рекомендациями государственных научных метрологических центров России.

Вся метрологическая деятельность в Российской Федерации основывается на **конституционной норме**, которая устанавливает, что в федеральном ведении находятся стандарты эталоны, метрическая система и исчисление времени, и закрепляет централизованное руководство основными вопросами законодательной метрологии, такими как единицы физических величин, эталоны и связанные с ними другие метрологические основы. Закон закрепляет ряд основных понятий метрологии. Одним из главных является **единство измерений** – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

Цели Федерального закона о единстве измерений:

- защита от недостоверных результатов измерений;
- содействие научно-техническому и экономическому прогрессу на основе использования эталонов и результатов измерений гарантированной точности;
- создание благоприятных условий для международных и межфирменных связей;
- адаптации российской системы измерений к мировой практике.

Основные понятия, применяемые для целей Закона

В ст. 1 приведены основные понятия, которые законодательно закреплены и принимаются для целей Закона. К ним относятся понятия единства и средства измерений, эталон, метрологическая служба, поверка и калибровка средств измерений, аккредитация на право поверки и другое.

Закон устанавливает, что Государственное управление по обеспечению единства измерений (статья 4) осуществляется **Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии** (Ростехрегулирование).

Закон определяет, что в РФ (статьи 6-8) допускаются к применению единицы физических величин Международной системы единиц, принятой Генеральной конференцией по мерам и весам, рекомендованные Международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ).

В статье 9 указано, что измерения должны осуществляться в соответствии с аттестованными в установленном порядке методиками выполнения измерений (МВИ)

Закон определяет состав и компетенцию ГМС и иные государственные службы ОЕИ (ст.10). ГМС выполняет работы по ОЕИ в масштабах страны и включает:

- государственные научные метрологические центры и научно-исследовательские институты (см. рис.6, несущие ответственность за создание, хранение и применение государственных эталонов и разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений в закреплённом виде измерений;

- органы ГМС на территории автономной области, автономных округов, краев, областей, городов Москвы и Санкт-Петербурга. Их деятельность включает создание государственных и вторичных эталонов, разработку систем передачи размеров единиц ФВ рабочим СИ, государственный надзор за производством, состоянием, применением, ремонтом СИ, метрологическую экспертизу документации и важнейших видов продукции, метрологическое руководство метрологической службой юридических лиц.

К иным государственным службам ОЕИ относятся:

- Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) – сеть организаций, несущих ответственность за воспроизведение и хранение единиц времени и частоты и передачу их размеров, а также за обеспечение потребителей в народном хозяйстве информацией о точном времени, за выполнение измерений времени и частоты в установленных единицах и шкалах;

- Государственная служба стандартных образцов состава и свойств вещества и материалов (ГССО) – сеть организаций, несущих ответственность за создание и внедрение стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов с целью обеспечения единства измерений;

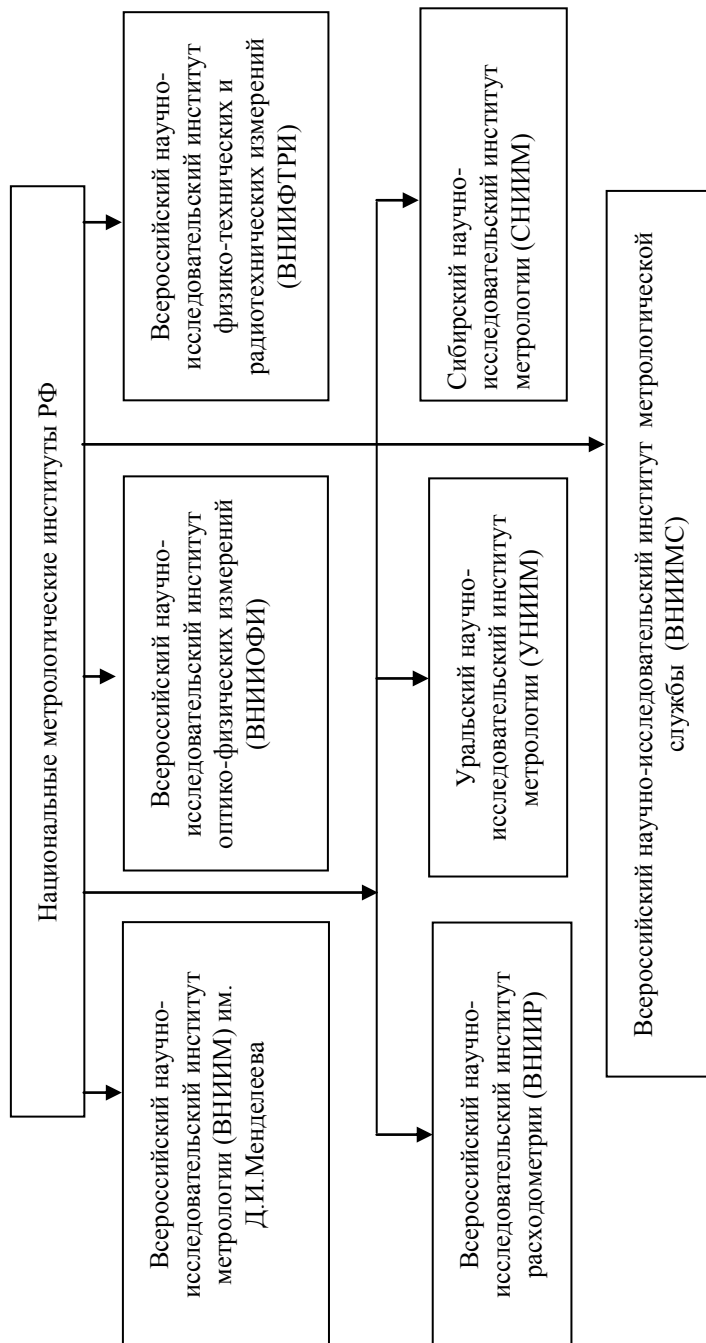


Рис. 6 – Национальные метрологические институты РФ

- Государственная служба стандартных справочных данных и физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД) - сеть организаций, несущих ответственность за получение и информационное обеспечение заинтересованных лиц данными о физических константах и свойствах веществ и материалов, основанных на исследованиях и высокочастотных измерениях.

Государственная метрологическая служба подчиняется по вертикали только Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии, в рамках которого она существует обособленно и независимо.

Метрологические службы государственных органов управления и юридических лиц (статья 11) создаются в необходимых случаях для выполнения работ по ОЕИ.

При выполнении работ в некоторых сферах деятельности в соответствии со статьей 13 Закона (здравоохранение, охрана окружающей среды, обеспечение безопасности труда, торговые операции, оборона и др.) создания метрологических служб является обязательным.

ГМК и Н– деятельность, осуществляемая государственной метрологической службой или метрологической службой юридического лица для проверки соблюдения установленных метрологических правил и норм.

Все разрабатываемые, производимые и находящиеся в эксплуатации СИ делятся на две группы:

- применяемые в сферах распространения ГМК и Н;
- не применяемые в сферах распространения ГМК и Н.

Средства измерений первой группы распространяются на жизненно важные для государства сферы деятельности и могут применяться только после утверждения типа, проведения их первичной поверки и последующих периодических поверок в процессе эксплуатации. Для СИ второй группы надзор со стороны государства не проводится.

Государственный метрологический контроль (ГМК) включает:

- утверждение типа СИ;
- поверку СИ, в том числе эталонов;

- лицензирование деятельности на право изготовления, ремонта, продажи и проката СИ.

Утверждение типа СИ – решение (уполномоченного на это государственного органа управления) о признании типа СИ узаконенным для применения на основании их испытаний государственным научным метрологическим центром или другой организацией, аккредитованной на этот вид деятельности. Решение утверждается и удостоверяется сертификатом. Утвержденный тип СИ вносится в Государственный реестр СИ.

Поверка СИ – установление органом ГМС (или другим официально уполномоченным на то органом, организацией) пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям (см.п.2.1.5).

Лицензирование – выполняемая в обязательном порядке процедура выдачи лицензии на осуществление деятельности на какой-либо вид деятельности.

ГМН осуществляется за

- выпуском, состоянием и применением СИ;
- соблюдением метрологических правил и норм;
- количеством товаров, отчуждаемых при совершении торговых операций (переход материальных ценностей от одного лица к другому);
- за количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их фасовке и продаже.

Основная цель ГМН – защита интересов граждан и государства от отрицательных последствий, вызванных недостоверными результатами измерений.

В сферах деятельности, где ГМК и Н не являются обязательными, для обеспечения метрологической исправности СИ применяется калибровка.

В Законе предусмотрена юридическая ответственность за нарушение метрологических правил и норм (ст.25). Устанавливаются меры пресечения или предупреждения нарушений:

- запреты на применение и выпуск СИ;
- погашение поверительных клейм и аннулирование свидетельств о поверке;

- изъятие СИ из эксплуатации;
- выдача обязательных предписаний об устранении нарушений.

Гражданско-правовая ответственность наступает в ситуациях, когда причиняется имущественный или личный ущерб (возмещение ущерба).

Уголовная ответственность наступает, когда имеются признаки состава преступления, предусмотренные уголовным кодексом. К ним относятся: халатность, нарушение правил метрологии, выпуск или продажа товаров (услуг), не отвечающих требованиям безопасности.

Дисциплинарная ответственность определяется администрацией предприятия на основании Кодекса законов о труде.

Обеспечение единства измерений является также и задачей различных международных организаций по метрологии.

Международная организация мер и весов (МОМВ) – межправительственная организация, в состав которой входит **Международное бюро мер и весов (МБМВ)**, которое находится в городе Севре близ Парижа. Задача МБМВ состоит в том, чтобы гарантировать международную однородность измерений и их соответствие Международной системе единиц СИ. Эта задача многогранна и решается путем либо прямого распространения эталонов (как в случае массы), либо координацией через международные сравнения эталонов (как в длине, электричестве, радиометрии). Бюро выполняет исследования, связанные с измерениями (например, нового определения секунды и метра), организует международные сравнения национальных эталонов и выполняет калибровки для государств-членов. В МБМВ хранятся международные прототипы ряда мер и эталоны единиц некоторых ФВ. В соответствии с метрической конвенцией для осуществления руководства деятельностью МБМВ был утвержден **Международный комитет мер и весов (МКМВ)**, который подотчетен Генеральной конференции мер и весов (ГКМВ). Последняя выбирает членов комитета на периодических (раз в 4 года) собраниях представителей правительств государств-членов.

Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) учреждена в 1956 г., объединяет более 80 государств. Цель ее – разработка общих

вопросов законодательной метрологии: установление классов точности СИ, порядок поверки и калибровки СИ, гармонизация методов сличения, поверок и аттестации эталонов, выработка оптимальных форм организации метрологических служб и т.п.

Основными международными организациями, осуществляющими деятельность в области международной стандартизации, являются Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная электротехническая комиссия (МЭК)

Международная организация по стандартизации ISO (ИСО) создана в 1946 году.

Задачи ИСО – содействовать развитию стандартизации и смежных видов деятельности с целью обеспечения международного обмена товарами и услугами, а также развитию сотрудничества в интеллектуальной, научно-технической и экономической областях.

Стандарты ИСО позволяют существенно облегчить обмен товарами, услугами и идеями между странами.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) создана в 1906 году, ее основная цель – содействие международному сотрудничеству по стандартизации в области электротехники, электроники, радиосвязи, приборостроения путем разработки международных стандартов и других документов.

Кроме ИСО и МЭК в международной стандартизации участвуют, в меньшем объеме, и другие международные организации. Такие, как Международная конференция по измерительной технике и приборостроению (ИМЕКО), Международный консультативный комитет по радиосвязи (МККР), Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН), Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО), Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и др.

К региональным организациям по стандартизации относятся Европейский комитет по стандартам (СЕН), Межскандинавская организация по стандартизации (ИНСТА).

В СНГ для работы по стандартизации, метрологии и сертификации создан в 1992 году Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и

сертификации СНГ (МГС), в котором представлены все национальные организации по стандартизации этих государств. МГС принимает межгосударственные стандарты.

Методические указания

При изучении этого раздела обратите внимание на структуру основ метрологического обеспечения (рис.5); нормативно-правовые основы метрологии, со всеми аспектами которой необходимо подробно познакомиться (рис.6). Изучите Основные положения Закона РФ «Об обеспечении единства измерений». Уясните, что в настоящее время управляющим органом по обеспечению единства измерений является Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование). Обратите внимание на состав и компетенцию Государственной метрологической службы и иных государственных служб ОЕИ. Какие работы они выполняют. Четко усвойте, что такое Государственный метрологический контроль и надзор, их назначение и выполняемые функции. При этом Вам необходимо обратиться к ранее рассмотренным вопросам поверки и калибровки. Познакомьтесь подробно с международными, региональными и другими организациями по метрологии.

Литература: [2. с. 82-90]; [4. с. 82-90].

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под метрологическим обеспечением?
2. В чем состоят нормативно-правовые аспекты метрологии?
3. Каковы задачи Ростехрегулирования в сфере метрологии?
4. Каковы основные функции Государственной метрологической службы?
5. Охарактеризуйте взаимосвязь отечественных и международных организаций.
6. В чем состоит Государственный метрологический контроль и надзор?

2.5 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТИ

Любые измерения приобретают какую-то значимость лишь тогда, когда их результатам можно доверять. Измерения проводят с различными целями:

- для наблюдения за количественными и качественными изменениями объекта измерений;
- когда необходимо удостовериться в том, что производимая продукция соответствует заданным качественным и количественным свойствам (признакам);
- для определения неизвестных свойств объекта измерений.

В любом случае главным в результате измерения всегда остается оценка истинного значения физической величины (действительное значение) $x_{ист}$. Истинное значение $x_{ист}$ рассматривается как идеальная в качественном и количественном отношениях характеристика данной физической величины. Истинное значение величины неизвестно, и его применяют только в теоретических исследованиях. Какими бы точными не были средства и методы измерений, как бы тщательно измерения не выполнялись, их результат всегда отличается от истинного значения измеряемой величины, то есть определяется с некоторой погрешностью Δ .

2.5.1 Погрешности измерений

Погрешностью результата измерения (или измерений) называют отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины:

$$\Delta = \bar{\sigma}_{\text{из}} - \bar{\sigma}_{\text{ист}}. \quad (3)$$

Истинное значение измеряемой величины всегда неизвестно, и на практике мы имеем дело с действительными значениями величин $x_{\text{д}}$, найденным опытным путем и настолько приближающимся к $x_{\text{ист}}$, что для данных условий оно может быть использовано вместо него.

Формула для определения погрешности в связи с этим приобретает вид:

$$\Delta = \bar{\sigma}_{\text{д}} - \bar{\sigma}_{\text{ист}}. \quad (4)$$

Оценка достоверности результата измерений, то есть определение погрешности измерений – одна из основных задач метрологии. Это одно из важных мероприятий по обеспечению единства измерений. Не располагая информацией о значении и характере погрешности Δ , измерение нельзя считать достоверным.

2.5.2. Источники погрешностей. Классификация погрешностей

Среди источников погрешностей можно выделить два основных. Это несовершенство математических моделей объекта измерений, СИ, методов измерений, влияние среды измерения, субъективная погрешность оператора при проведении измерений, способы обработки результатов измерений.

Количество факторов, влияющих на точность измерения, достаточно велико, и любая классификация погрешностей измерений условна. Рассмотрим шесть категорий погрешностей: по способу выражения погрешности, по взаимодействию с выходным сигналом, по характеру режима измерений, по способу выявления, по отношению к внешним воздействиям, по причинам возникновения.

1. По способу выражения погрешности делятся на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютная погрешность измерений – разность между показанием прибора $x_{изм}$ и истинным значением $x_{ист}$ (действительным x_0) измеряемой величины

$$\Delta = |\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\sigma}_a|.$$

Абсолютные погрешности меры и измерительного прибора имеют различный смысл. В качестве x_0 выступает либо номинальное значение (например, меры), либо значение величины, измеренной более точным (не менее чем на порядок, в 10 раз) средством измерений. Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой физической величины и может быть задана одним числом

$$\Delta = \pm \dot{a};$$

в виде линейной зависимости

$$\Delta = \pm ax, \Delta = \pm(\dot{a} + ax);$$

в виде функции

$$\Delta = f(x),$$

графика или таблицы.

Абсолютная погрешность не может служить показателем точности измерений. Абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком, называется поправкой.

Поскольку абсолютная погрешность выражается в абсолютных единицах физической величины, то это не дает возможности сравнивать средства измерения, измеряющие разные физические величины. Для оценки качества измерения средством измерений чаще пользуются (для характеристики точности результатов измерения) понятием *относительной* погрешности δ выражаемой в относительных единицах или в %.

Относительная погрешность измерений – отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой физической величины, выраженная в долях значений измеряемой физической величины, или в процентах

$$\delta = \pm(\Delta/\bar{a}), \text{ или } \delta = \pm(\Delta/\bar{a})100\%.$$

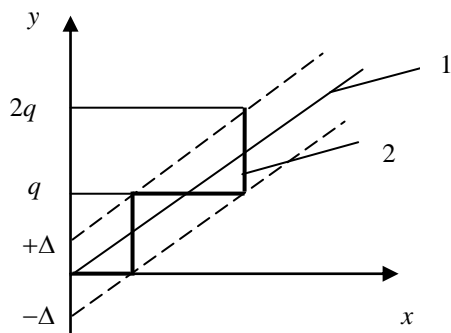


Рис.7 – Квантование погрешности цифровых СИ: 1- номинальная, 2- реальная характеристика СИ

Относительная погрешность характеризует качество измерения. Она обычно существенно изменяется вдоль шкалы аналогового прибора, с уменьшением значений измеряемой величины – увеличивается. Поэтому в метрологии существует принцип запрета измерений на начальном участке шкалы с начальной нулевой отметкой.

Точность измерений – качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Не имеет строгого определения и используется для качественного сравнения измерительных операций. Количественно точность измерений может быть выражена значением, обратным модулю относительной погрешности

$$T = 1/[\delta].$$

Но эта очень наглядная характеристика точности результата измерения не годится для нормирования погрешности средств измерений, так как при различных значениях x принимает различные значения вплоть до $\delta = \infty$ при $x = 0$. Поэтому для указания и нормирования погрешности средств измерений используется еще одна разновидность погрешности - приведенная погрешность.

Приведенная погрешность – отношение абсолютной погрешности к нормируемому значению x_N (обычно это диапазон измерений):

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{\bar{\sigma}_N} 100\%.$$

Нормирующее значение x_N обычно выбирают в зависимости от вида и характера шкалы прибора.

Эта погрешность характеризует потенциальную точность средства измерения.

Специфическим видом погрешности цифровых средств измерений и дискретных преобразователей является погрешность квантования, которая определяется разностью округленного значения измеряемой величины и номинального значения. На рис.7 приведена текущая разность (погрешность квантования) номинальной и реальной характеристик средства измерений.

2. По взаимодействию с выходным сигналом.

В зависимости от характера изменения величины погрешности при изменении измеряемой величины погрешности делятся на аддитивные и мультипликативные.

Аддитивные погрешности обусловлены смещением статической характеристики прибора вверх или вниз (вправо или влево). Аддитивная погрешность не зависит от чувствительности прибора и является постоянной для всех значений входной величины в пределах диапазона измерений. Влияние аддитивных погрешностей на статическую характеристику прибора показано на рис. 8.

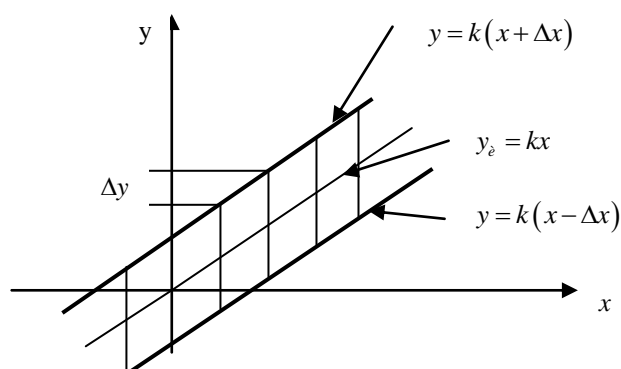


Рис.8 – Влияние аддитивных погрешностей на статическую характеристику СИ: $y_{и}$ - идеальная, y - фактическая

К аддитивной погрешности прибора можно отнести погрешность, вызванную например, смещением шкалы, трением в опорах электроизмерительного прибора, помехами, внутренними шумами, погрешность квантования в цифровых

приборах. Аддитивные погрешности преобладают у большинства стрелочных приборов.

При выражении аддитивной погрешности в виде абсолютной погрешности она имеет постоянную величину, не зависящую от значения измеряемой величины x :

$$\Delta = y - y_e = k(x + \Delta x) - kx = k\Delta x = const,$$

так как $k = const$, $\Delta x = const$.

При выражении аддитивной погрешности в виде относительной погрешности получаем

$$\delta y = \Delta y / y_e = k\Delta x / kx = \Delta x / x = var,$$

так как $\Delta x = const$, $x = var$ (рис.9).

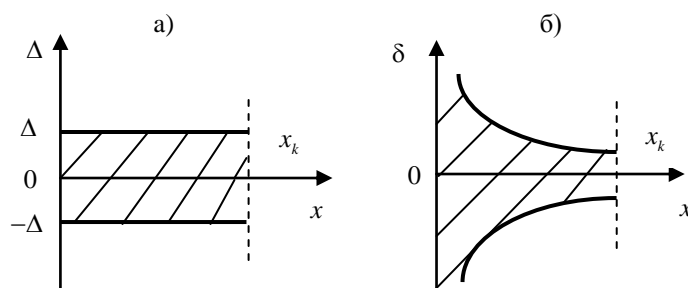


Рис. 9 – Изменение аддитивной погрешности при выражении: а) – в виде абсолютной погрешности; б) – в виде относительной погрешности

Мультипликативные погрешности возникают из-за погрешностей задания передаточного коэффициента k статической характеристики $y = kx$. Влияние мультипликативных погрешностей на статическую характеристику прибора показано на рис. 10.

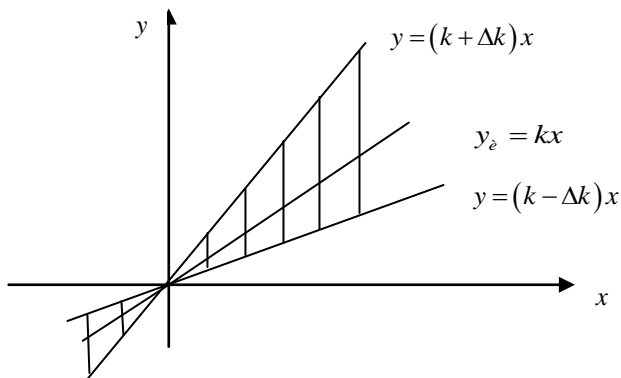


Рис.10 – Влияние мультипликативных погрешностей на статическую характеристику СИ: $y_{и}$ - идеальная, y - фактическая

Такая погрешность, получаемая путем умножения, является погрешностью чувствительности. Пример причины возникновения – изменение коэффициента усиления усилителя, изменение опорного напряжения в цифровом вольтметре и другое. Положение границ полосы такой погрешности возрастает пропорционально росту входной величины x , а при $x=0$ она равна 0 (рис.11).

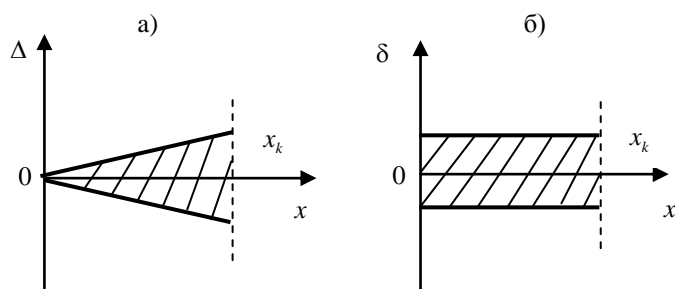


Рис. 11 – Изменение мультипликативной погрешности при выражении: а) – в виде абсолютной погрешности; б) – в виде относительной погрешности

Мультипликативная погрешность (при выражении ее в виде абсолютной погрешности) пропорциональна значению измеряемой величины:

$$\Delta = y - y_{\varepsilon} = (k + \Delta k)x - kx = \Delta kx = \text{var},$$

так как $\Delta k = \text{const}$, $x = \text{var}$.

При выражении мультипликативной погрешности в виде относительной погрешности получим:

$$\delta y = \Delta y / y_{\varepsilon} = \Delta kx / kx = \Delta k / k = \text{const},$$

так как $\Delta k = \text{const}$, $k = \text{const}$.

Таким образом, у приборов с преобладающими мультипликативными погрешностями постоянной остается относительная погрешность.

Существуют приборы, у которых аддитивные и мультипликативные погрешности соизмеримы. К этому классу приборов относятся цифровые приборы. Влияние соизмеримых аддитивных и мультипликативных погрешностей на статическую характеристику прибора показано на рис. 12.

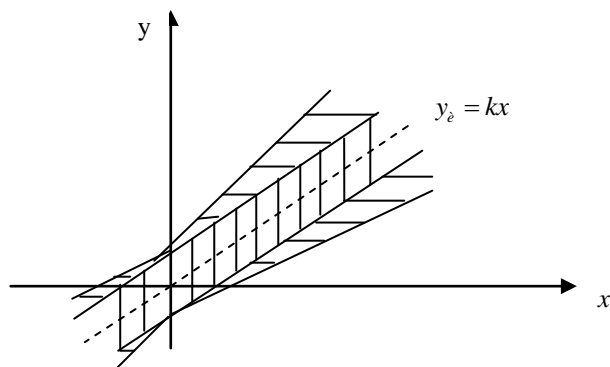


Рис.12 – Влияние соизмеримых аддитивных и мультипликативных погрешностей на статическую характеристику СИ
 характеристика СИ: y_n - идеальная

Суммарная абсолютная погрешность выражается уравнением

$$\Delta = a + bx,$$

То есть аддитивная (a) и мультипликативная (bx) погрешности присутствуют одновременно (рис.13, а).

Относительная погрешность (рис.13,б) выражается формулой

$$\delta = \pm [c + d(x_k/x - 1)].$$

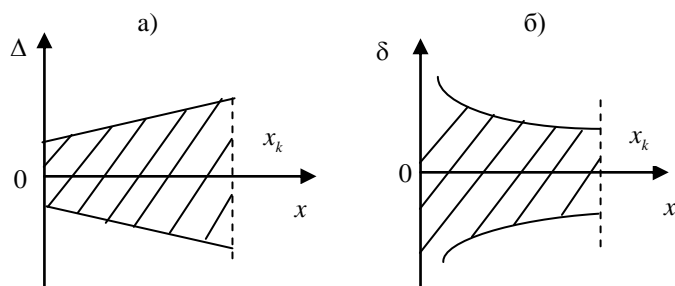


Рис. 13 – Изменение совместной аддитивной и мультипликативной погрешностей при выражении: а) – в виде абсолютной погрешности; б) – в виде относительной погрешности

3. По характеру режима измерений погрешности делятся на статические и динамические.

Статические – возникают при измерении установившегося значения измеряемой физической величины, то есть когда эта величина перестает изменяться во времени.

Динамические - имеют место при динамических измерениях, когда измеряемая величина изменяется во времени и требуется установить закон ее изменения. Причина их появления состоит в несоответствии скоростных (временных) характеристик прибора и скорости изменения измеряемой величины. Динамическая погрешность зависит как от свойств СИ, так и от характера изменения во времени измеряемой величины. По этой причине динамическая погрешность средства измерений не может быть нормирована аналогично тому, как это делается в статическом режиме.

4. По причинам возникновения.

Выделяют объективные (не зависящая от личных качеств человека, производящего измерение) и субъективные.

Субъективная (личная) погрешность измерения обусловлена погрешностью отсчета оператором показаний по шкалам средства измерений, диаграммам регистрирующих приборов. Они вызваны состоянием оператора, его положением во время работы, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами средства измерений.

4. По отношению к внешним воздействиям погрешности делят на основные и дополнительные.

Основная погрешность СИ – погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях, то есть в условиях, которые определены в нормативно-технической документации как нормальные.

Дополнительная погрешность СИ – составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения. Дополнительная погрешность может носить случайный характер (нестабильность режима работы объекта измерений, электромагнитные наводки, неинформативные параметры

процесса, колебания параметров источников питания, сбои) и прогрессирующий (от температуры, влаги, давления, ударов и вибраций).

5. По способу выявления различают систематические и случайные погрешности.

Систематическая погрешность СИ – составляющая погрешности СИ остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при многократных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность СИ – составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся случайным образом. Случайные погрешности средств измерений обусловлены случайными изменениями параметров составляющих эти СИ элементов и случайными погрешностями отсчета показаний приборов.

При конструировании прибора его случайную погрешность стараются сделать незначительной в сравнении с другими погрешностями. У хорошо сконструированного и выполненного прибора случайная погрешность незначительна. Однако при увеличении чувствительности средств измерений обычно наблюдается увеличение случайной погрешности. Тогда при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях результаты будут различными. В таком случае приходится прибегать многократным измерениям и к статистической обработке получаемых результатов. Как правило, случайную погрешность приборов снижается до такого уровня, что проводить многократные измерения нет необходимости.

Грубые и промахи погрешности измерений – случайные погрешности измерений, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях погрешности. Они возникают, например, в результате невнимательности оператора, сбоя аппаратуры и тому подобное. Как правило, они выявляются в результате обработки результатов измерений с помощью специальных критериев.

2.5.3 Систематические погрешности измерений и способы их уменьшения

Правильность измерений определяется как качество измерений, отражающее близость к нулю систематической составляющей погрешности результата измерения.

Эти погрешности в большинстве случаев изучены до начала измерений. Результат измерений может быть уточнен или путем внесения поправок, или путем использования таких методов измерений, которые дают возможность исключить влияние систематических погрешностей без их определения (раздел 2.2., рис.4).

Систематические погрешности измерения остаются постоянными (постоянные) или закономерно изменяются (прогрессирующие, периодические, сложные непериодические) при повторных измерениях одной и той же величины.

Постоянные – длительное время сохраняющие свое значение. Они встречаются наиболее часто.

Переменные систематические погрешности делят на прогрессирующие и периодические.

Прогрессирующие погрешности в процессе измерения монотонно возрастают или убывают в функции времени или внешних влияющих величин.

Периодические погрешности – погрешности, периодически изменяющие значение и знак.

По причинам возникновения систематические погрешности подразделяются на методические, инструментальные, субъективные.

Методические возникают вследствие несовершенства, неполноты теоретических обоснований принятого метода измерений, использования упрощенных допущений при выводе применяемых формул, из-за неправильности выбора измеряемых величин.

Инструментальные составляющие погрешности обусловлены свойствами применяемых средств измерений, их стабильностью, чувствительностью к внешним воздействиям, их влиянием на объект измерений и др.

Систематические погрешности устойчиво искажают результаты измерений, поэтому анализ возможных причин появления погрешности, способы обнаружения и устранения их – основные задачи каждого точного измерения.

Методы исключения систематических погрешностей

При проведении измерений стараются исключить, уменьшить или учесть влияние систематических погрешностей. Однако, сначала их надо обнаружить. Постоянные систематические погрешности можно обнаружить только путем сравнения результатов измерений с другими, полученными с использованием более точных методов и средств измерений.

При обнаружении погрешности ее стараются исключить путем устранения источников погрешности до начала, в ходе и после измерений, внося поправки в результат измерений.

Устранение источников погрешности **до начала измерений** является наиболее рациональным, так как в этом случае существенно упрощается и ускоряется процесс измерений. Оператор до начала работы удаляет источники погрешности (например, источники электромагнитного излучения), обеспечивает защиту измерительной аппаратуры и объекта измерений от этих источников и правильную их установку и подключение.

В процессе измерений для исключения постоянных систематических погрешностей можно использовать один из методов (разд.2.2.): замещения, противопоставления и компенсации погрешности по знаку, симметричных наблюдений.

После измерений исключить или скомпенсировать систематическую погрешность, при условии обнаружения причин ее возникновения, можно путем **введения поправок**. Поправкой называется значение величины, одноименной с измеряемой, которое нужно прибавить к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности. Поправка по численному значению равна систематической погрешности и противоположна ей по знаку. В некоторых случаях систематическую погрешность исключают путем умножения результата измерений на поправочный коэффициент. В результаты измерений часто приходится вводить большое число поправок. Число поправок должно быть разумным, пока доверительные границы погрешности уменьшаются.

Если удастся обнаружить систематическую погрешность и устранить ее, то результаты наблюдений называются *исправленными*. Однако, вследствие неточности поправок удастся скомпенсировать только часть систематических погрешностей. Систематическая погрешность, оставшаяся после введения поправок, называется неисключенной систематической погрешностью (НСП). Она входит в результат измерений и искажает его.

Чтобы количественно оценить систематическую погрешность, проводят дополнительные исследования, специфичные для каждого конкретного измерения.

Уменьшение влияния систематической погрешности при сложных закономерностях может дать перевод систематических погрешностей в случайные. В этом случае для обработки результатов измерений прибегают к их статистической обработке, корреляционному и регрессионному анализу.

2.5.4. Правила суммирования погрешностей

При определении результирующей погрешности аналитически или экспериментально определяют значения частных погрешностей, которые затем суммируют.

Систематические погрешности ϑ_i на основании того, что они являются математическим ожиданием общей погрешности, а случайные являются центрированными случайными величинами с математическим ожиданием, равным нулю, суммируются алгебраически (с учетом их знаков)

$$\vartheta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \vartheta_i.$$

Суммирование случайных погрешностей при наличии корреляционных связей между ними производится по правилу вычисления дисперсии суммы случайных величин. На его основе вычисляется среднеквадратическое значение результирующей погрешности

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \gamma_{ji} \sigma_i \sigma_j}, \quad (5)$$

где σ_{ij} – среднее квадратическое значение частной погрешности, γ_{ij} – коэффициент корреляции частных погрешностей Δ_i , Δ_j .

Если случайные погрешности выразить в относительных значениях $\delta_i = \sigma_i/x_i$, то формула (5) принимает вид

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} \delta_i \delta_j}.$$

Информация о мере корреляционных связей, как правило, отсутствует. Поэтому на практике рассматривают два крайних случая $\gamma_{ij}=0$ и $\gamma_{ij}=\pm 1$. В первом случае (что обычно имеет место на практике) погрешности суммируются геометрически

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}.$$

1. Правила суммирования погрешностей.

Методические указания

При изучении этого раздела необходимо подробно изучить, какие бывают погрешности, каковы их источники; графики изменения той или иной погрешности от измеряемой величины; четко знать признаки систематических и случайных погрешностей, уметь привести примеры разных видов погрешностей.

Литература: [2. с.42-81]; [3. с.257-290]; [5. с.37-38]; [7. с.51-98, 114-121].

Вопросы для самопроверки

2. Что называется погрешностью?
3. Чем обусловлены погрешности СИ? Назовите источники погрешностей.
4. Как изменяется ширина полосы погрешности для мультипликативной (аддитивной) погрешности СИ при изменении измеряемой величины?
5. Каково влияние соизмеримых аддитивных и мультипликативных погрешностей на статическую характеристику СИ?
6. Чем вызваны дополнительные погрешности? Как они учитываются при суммировании погрешностей?
7. Что такое поправка? Для каких погрешностей она вводится?
8. Правила суммирования погрешностей.

2.5.5 Случайные погрешности

Когда при проведении с одинаковой тщательностью и в одинаковых условиях повторных наблюдений одной и той же постоянной величины получаем результаты, отличающиеся друг от друга, это свидетельствует о наличии в них случайных погрешностей. Каждая такая погрешность возникает вследствие одновременного воздействия на результат наблюдений многих случайных возмущений и сама является случайной величиной. В этом случае предсказать результат отдельного наблюдения и исправить его введением поправки невозможно. Можно лишь с определенной долей уверенности утверждать, что истинное значение измеряемой величины находится в пределах разброса наблюдений от x_{min} до x_{max} , где x_{min} , x_{max} – соответственно нижняя и верхняя границы разброса. Однако остается неясным, какова вероятность появления того или иного значения погрешности, какое из многих лежащих в этой области значений величины принять за результат измерений и какими показателями охарактеризовать случайную погрешность результата. Для ответа на эти вопросы требуется принципиально иной, чем при анализе систематических погрешностей, подход. Этот подход основывается на рассмотрении результатов наблюдений, результатов измерений и случайных погрешностей как случайных величин. Поэтому при формулировании конкретной задачи измерений и при получении результатов наблюдений необходимо, прежде всего, проверить наличие закономерностей в распределении наблюдений. Если такие закономерности обнаруживаются, то распределение наблюдений обладает статистической устойчивостью и для их обработки возможно применение методов теории вероятностей и математической статистики. При этом необходимо отметить, что обнаружение статистических закономерностей в распределении результатов наблюдений проводится после исключения из них всех известных систематических погрешностей.

Методы теории вероятностей и математической статистики позволяют установить вероятностные (статистические) закономерности случайных

погрешностей и на основании этих закономерностей дать количественные оценки результата измерений и его случайной погрешности.

Описание случайных погрешностей. Методы вероятностного описания погрешностей результатов прямых измерений

Любое измерение по шкале отношений предполагает сравнение неизвестного размера ФВ с известным (единицей СИ) и выражение первого через второй. Тогда процедура сравнения запишется в виде (2).

Это сравнение происходит под влиянием множества случайных и неслучайных, аддитивных и мультипликативных факторов, точный учет которых невозможен, а результат совместного воздействия непредсказуем. Ограничимся для простоты рассмотрения только аддитивными воздействиями, совместное влияние которых можно учесть случайным слагаемым η , тогда получим следующее выражение:

$$\frac{Q}{[Q]} + \eta = x.$$

Это уравнение выражает некоторое действие, процедуру сравнения в реальных условиях, которая и является измерением. Главной особенностью измерительной процедуры является то, что при ее повторении из-за случайного характера η отсчет x по шкале отношений получается все время разным. Слагаемое η , являющееся случайным, не может быть известно в принципе. Это закон природы. Поэтому определить истинное значение измеряемой ФВ невозможно. Отсчет x – случайная величина. Он не может быть представлен одним числом. Его можно лишь описать словами или математическими символами, представить массивом экспериментальных данных, таблично, графически или аналитическим выражением.

Для характеристики частоты появления различных значений случайной величины x (случайных погрешностей Δ) теория вероятностей предлагает пользоваться законом распределения вероятностей различных значений этой величины.

Теория погрешностей основывается на аналогии между появлением случайных погрешностей при многократно повторяемых измерениях и совершением случайных событий.

В основе теории погрешностей лежат два предположения, подтверждаемых опытом.

При большом числе измерений случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака, встречаются одинаково часто.

Большие (по абсолютной величине) погрешности встречаются реже, чем малые, то есть вероятность появления погрешности уменьшается с ростом величины погрешности.

Характеристики, позволяющие найти функцию распределения случайной величины, называют законом распределения вероятностей этой величины.

Дифференциальные и интегральные законы распределения случайной величины

Случайная величина наилучшим и исчерпывающим образом характеризуется в теории вероятностей **законом ее распределения**. Этот закон устанавливает связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими этим значениям вероятностям их появления. Существует две формы описания закона распределения случайной величины – дифференциальная и интегральная. Причем, в метрологии в основном используется дифференциальная форма – закон распределения плотности вероятностей случайной величины.

Дифференциальный закон распределения характеризуется **плотностью распределения вероятностей** $p(x)$ случайной величины x . Вероятность P попадания случайной величины в интервал от x_1 до x_2 при этом дается формулой:

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx.$$

Графически эта вероятность представляет собой отношение площади под кривой $p(x)$ в интервале от x_1 до x_2 (рис.14) к общей площади, ограниченной всей кривой распределения.

График дифференциальной функции распределения, который называют *кривой распределения*, чаще всего имеет колоколообразную форму.

Как правило, площадь под всей кривой распределения вероятностей нормируют на единицу.

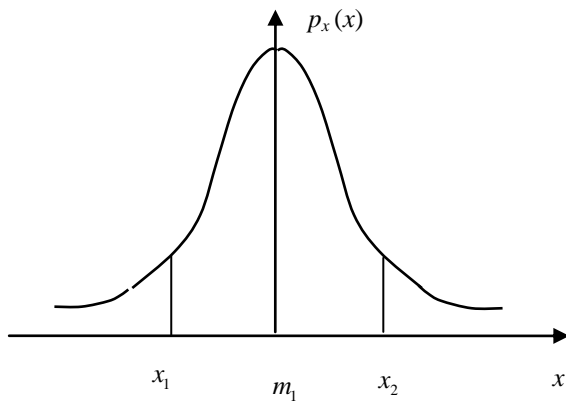


Рис.14 – График плотности распределения случайной величины x

В данном случае представлено распределение непрерывной случайной величины. Кроме них существуют и дискретные случайные величины, принимающие ряд определенных значений, которые можно пронумеровать.

От дифференциальной функции распределения легко перейти к интегральной.

Интегральный закон распределения случайной величины представляет собой функцию $F(x)$ (рис.15), определяемую формулой

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x)dx. \quad (6)$$

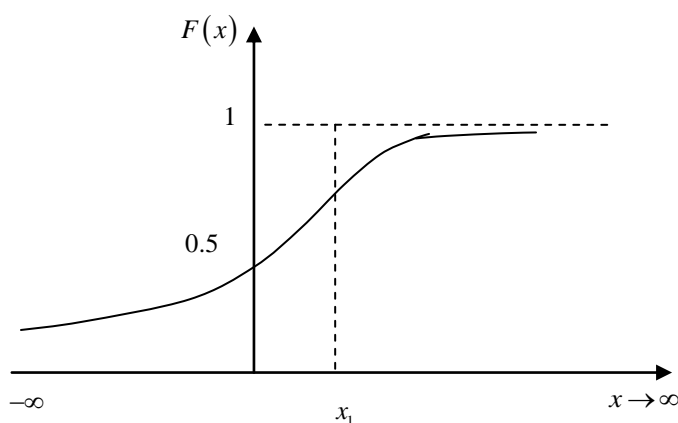


Рис.15 - Интегральный закон распределения случайной величины

Вероятность того, что случайная величина будет меньше x_1 дается значением функции $F(x)$ при $x = x_1$

$$F(x_1) = p\{x < x_1\}.$$

Это неубывающая функция x , изменяющаяся от $F(-\infty) = 0$ до $F(+\infty) = 1$.

Дифференциальная функция распределения является функцией, производной от интегральной по своему аргументу

$$p_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx}.$$

Обычно при измерениях принимаем измеряемые величины за непрерывные. Непрерывность интегральной функции распределения результатов наблюдений выражает собой тот факт, что результат наблюдения может принять любое до опыта выбранное значение только с нулевой вероятностью. Каждому значению x_i соответствует определенная вероятность p_i , но вероятность любого значения непрерывной случайной величины бесконечно мала.

Используя понятия функций распределения, легко получить выражения для вероятностей того, что результат наблюдения x или случайная погрешность примет при проведении измерения некоторое значение в интервале $[x_1; x_2]$.

В терминах интегральной функции распределения имеем

$$\begin{aligned} P(x_1 < x \leq x_2) &= P\{-\infty < x \leq x_2\} - \\ &- P\{-\infty < x \leq x_1\} = F_x(x_2) - F_x(x_1), \end{aligned} \quad (7)$$

То есть вероятность попадания результата наблюдений или случайной погрешности в заданный интервал равна разности значений функции распределения на границах этого интервала.

Заменяя в полученных формулах (7) интегральные функции распределения на соответствующие плотности распределения вероятностей согласно выражению (6), получим формулы для искомой вероятности в терминах дифференциальной функции распределения

$$P\{x_1 < x \leq x_2\} = \int_{-\infty}^{x_2} p_x(x) dx - \int_{-\infty}^{x_1} p_x(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} p_x(x) dx. \quad (8)$$

Таким образом, вероятность попадания результата наблюдения или случайной погрешности в заданный интервал (8) равна площади, ограниченной кривой распределения, осью абсцисс и перпендикулярами к ней на границах этого интервала (рис. 14).

Произведение $p_x(x)dx$ называется элементом вероятности. Он равен вероятности того, что случайная величина x примет некоторые значения в

интервалах dx , и поэтому по форме кривой распределения можно судить о том, какие интервалы значений случайных погрешностей более, а какие менее вероятны. Для кривой распределения случайной величины, изображенной на рис.14, более вероятны малые значения погрешностей, лежащие вокруг $x=0$. Таким образом, результаты наблюдений в значительной степени сконцентрированы вокруг истинного значения измеряемой величины, и по мере приближения к нему элементы вероятности их появления возрастают.

Это даёт основание принять за оценку истинного значения измеряемой величины координату центра тяжести фигуры, образованной осью абсцисс и кривой распределения, и называемую математическим ожиданием (средним арифметическим) результатов наблюдений.

$$M[x] = m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xp_x(x)dx.$$

Теория показывает, что истинному значению измеряемой величины $x_{ист}$ соответствует то значение x , для которого плотность вероятности наибольшая.

Хотя закон распределения случайных величин является их полной вероятностной характеристикой, нахождение этого закона является довольно трудной задачей и требует проведения многочисленных измерений. Поэтому на практике для описания свойств случайной величины используют различные числовые характеристики распределений. К ним относятся моменты случайных величин: начальные и центральные, которые представляют собой некоторые средние значения. При этом если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, то моменты называются начальными, а если от центра распределения – то центральными.

Наибольший практический интерес представляет первый начальный момент первого порядка - математическое ожидание случайной величины (рис.14)

$$\alpha_1 = m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx. \quad (9)$$

Математическое ожидание определяет положение центра группирования случайной величины, вокруг которого наблюдается ее рассеяние.

Экспериментальной оценкой математического ожидания при многократных измерениях является среднее арифметическое значение измеряемой величины.

Центральный момент k -го порядка определяется формулой:

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^k p(x) dx. \quad (10)$$

Особую роль играет центральный момент второго порядка. Он называется дисперсией D случайной величины и характеризует рассеяние отдельных ее значений от центра распределений

$$\mu_2 = D = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^2 p(x) dx. \quad (11)$$

На практике чаще используется *среднее* квадратическое отклонение σ (СКО) случайной величины, определяемое формулой

$$\sigma = \sqrt{D}.$$

При более подробном изучении распределений случайной величины используются моменты более высоких порядков.

Все без исключения моменты обладают важным качеством: будучи характеристиками случайного числа, сами они не являются случайными. На практике невозможно получить закон распределения случайной величины, так как измерительная процедура не может быть повторена бесконечное число раз. Поэтому законы используются обычно только в качестве моделей.

Обработка результатов наблюдений, содержащих случайные погрешности

Получаемая в результате многократных наблюдений информация об истинном значении измеряемой величины и рассеивании результатов наблюдений состоит из ряда результатов отдельных наблюдений (ряда наблюдений) $x_1; x_2; \dots; x_n$, где n - число наблюдений. Нужно решить вопрос о том, как на основании полученной в эксперименте группы результатов наблюдений оценить истинное значение, то есть найти результат измерений, и как оценить его точность, то есть меру его приближения к истинному значению.

Эта задача является частным случаем статистической задачи нахождения оценок параметров функции распределения случайной величины на основании

выборки. Методы статистической обработки сводятся к определению **числовых оценок** параметров соответствующих законов распределения. Поэтому необходимо знание методов определения числовых характеристик распределений по экспериментальным данным. Совокупность всех возможных значений случайной величины называется **генеральной совокупностью**. При измерениях генеральная совокупность – непрерывная случайная величина (поскольку результат может быть любым в интервале возможных значений), характеризуемая каким-то законом распределения. Но для этого нужно произвести бесконечно большое число измерений, что лишено смысла. Число измерений всегда ограничено. Множество значений случайной величины, полученное в результате наблюдения (измерения) называется случайной выборкой или просто **выборкой**.

Основная задача статистической обработки – определение интересующих нас параметров распределения генеральной совокупности по случайной выборке из нее. Всякая однозначная функция от результатов измерений, дающая подходящее значение определяемого параметра генеральной совокупности, наз. **оценкой** этого параметра.

При проведении измерений в случае одномодального симметричного распределения генеральной совокупности достаточно оценить два параметра – математическое ожидание, оценка которого равнозначна оценке измеряемой величины, и дисперсию, характеризующую точность измерений. Поскольку результаты измерений случайны, то и вычисленная оценка – величина случайная. У нее свои математическое ожидание и дисперсия. Оценка параметра – относительная истина, с увеличением числа измерений она приближается к абсолютной. В соответствии с этим из основной задачи вытекают две другие, подчиненные ей, задачи:

Первая – установление способов получения оценок, обеспечивающих наилучшее приближение к истинным параметрам генеральной совокупности;

Вторая – апостериорное оценивание достигнутой точности приближения (оценивание дисперсности оценки). Такая задача наз. прямой. Обратная ей – определение необходимой точности измерений для обеспечения заданной точности оценки.

Оценка числовых характеристик законов распределения вероятности случайных величин (среднего значения, дисперсии) изображаемые точкой на числовой оси, называется **точечными**; интервалом – **интервальными**. В отличие от самих числовых характеристик законов распределения их оценки являются случайными величинами, причем их значения зависят от числа измерений, а распределение вероятности – от закона распределения вероятности отдельного измерения.

К точечным оценкам предъявляется ряд требований, определяющих их пригодность для описания самих параметров: состоятельность, несмещенность и эффективность.

Состоятельная оценка – это оценка, которая при увеличении числа наблюдений стремится к истинному значению ε оцениваемого параметра, то есть выполняется условие

$$P(|x^* - x_{\varepsilon n_0}| < \varepsilon) \rightarrow 1 \text{ при } n \rightarrow \infty.$$

Здесь x^* - оценка, ε - сколь угодно малое число.

Чем больше число измерений, тем ближе оценка к истинному значению.

Несмещенная оценка - оценка, математическое ожидание которой равно истинному значению оцениваемого параметра

$$M[x^*] = m_x = x_{\varepsilon n_0}.$$

Эффективная оценка – оценка, имеющая наименьшую дисперсию по сравнению с любой другой оценкой данного параметра, вычисленных по выборкам одинакового объема. Ее использование дает наибольшую точность оценивания по данной выборке.

Методы получения оценок.

1. *Метод моментов.*

По методу моментов оценка находится путем приравнивания моментов генеральной совокупности случайной величины x соответствующим выборочным моментам, полученным из эксперимента. Метод основан на законе больших чисел, согласно которому при большом объеме выборки выборочные моменты близки к моментам генеральной совокупности. В соответствие с этим метод дает

состоятельные оценки, точность которых возрастает с увеличением числа измерений. В качестве примера применения метода моментов получим оценки математического ожидания и дисперсии (все оценки имеют индекс «*»).

Как известно, первый начальный момент α_1 случайной величины x (9) есть математическое ожидание m_x

$$\alpha_1 = m_x = \langle x \rangle,$$

где скобки $\langle \rangle$ означают усреднение. Выборочный первый начальный момент есть среднеарифметическое результатов измерений:

$$\alpha_1^* = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где n – число измерений. Значит, по методу моментов оценка математического ожидания

$$m_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (12)$$

Второй центральный момент μ_2 есть дисперсия x (11):

$$\mu_2 = \langle (x - m_x)^2 \rangle = \sigma_x^2.$$

Выборочный второй центральный момент есть среднее арифметическое квадратов отклонений результатов измерений от их среднего арифметического (эмпирическая дисперсия)

$$\mu_2^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

Значит, оценка дисперсии S_x^2 с учетом (12)

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2. \quad (13)$$

Раскрывая скобки и суммируя, это выражение можно переписать в виде

$$S_x^2 = \alpha_2^* - (m_x^*)^2,$$

где $\alpha_2^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$ – оценка второго начального момента $\alpha_2 = m[x^2]$.

Аналогично можно получить оценки и других моментов.

2. Метод максимального правдоподобия.

Метод моментов прост, но в ряде случаев приводит к оценкам, обладающим только свойством состоятельности. Метод максимального

правдоподобия связан с более сложными вычислениями, но он всегда приводит к состоятельным оценкам, распределенным асимптотически (при $n \rightarrow \infty$) нормально, и эти оценки имеют наименьшую возможную дисперсию по сравнению с другими оценками, то есть они эффективны. Сущность метода состоит в следующем.

Пусть x_1, x_2, \dots, x_n – результаты n независимых измерений какой-то физической величины. Они представляют выборку из генеральной совокупности x результатов измерений. Пусть вид закона распределения плотности вероятности $f(x, \theta)$, но параметр θ этого распределения неизвестен и его требуется оценить по выборке. Для определения оценки параметра θ^* вводится так называемая функция правдоподобия

$$L = f(x_1, \theta) f(x_2, \theta) \dots f(x_n, \theta).$$

Здесь x_1, x_2, \dots, x_n – фиксированные результаты измерений; θ – переменная.

В качестве оценки θ^* берется такое значение θ , при котором функция правдоподобия максимальна. Это значение находится по правилам отыскания максимума: из уравнения $dL/d\theta = 0$ определяется $\theta = \theta^*$. Если закон распределения x зависит от нескольких параметров k , то оценки параметров определяются из решения системы уравнений $dL/d\theta_i = 0$ ($i = 1, \dots, k$). Рассмотрим идею метода на примере нормального закона. Опуская промежуточные выкладки, запишем оценку математического ожидания и дисперсии в виде

$$m_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2. \quad (14)$$

Сопоставим найденные оценки с оценками (12) и (13), полученными по методу моментов. Видим, что оценка математического ожидания одна и та же – среднее арифметическое результатов измерений. Но теперь в силу свойств метода максимального правдоподобия можно утверждать, что, будучи всегда состоятельной, для нормального распределения она и эффективна. Кроме того, эта оценка всегда несмещенная (можно показать, что $m_x^* = m_x$). Однако выражается она через истинное значение m_x в генеральной совокупности, которое, как правило, неизвестно. Воспользоваться оценкой (14) можно только, заменив в

ней m_x на m_x^* , но это обращает ее в ту же оценку (13). Расчеты показывают, что математическое ожидание оценки дисперсии не равно дисперсии и, значит, оценка (14) смещенная. Чтобы ликвидировать смещение, достаточно в (14) ввести множитель $n/(n-1)$ (множитель Бесселя). Мы получим оценку дисперсии (исправленную выборочную дисперсию)

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2,$$

которую и применяют на практике. Это оценка состоятельная и несмещенная, но неэффективная. Состоятельной, эффективной (для нормального распределения) и несмещенной оценкой дисперсии является оценка (14).

3. Метод наименьших квадратов.

Метод максимального правдоподобия наилучшим образом использует информацию о неизвестном параметре, содержащуюся в выборке. Однако при распределениях, отличных от нормального, его применение затруднено. В этих случаях более удобным может оказаться метод получения оценок – метод наименьших квадратов. При нормальном распределении оба метода дают одинаковые результаты.

Рассмотрим идею метода на примере оценивания математического ожидания. В соответствии с этой идеей в качестве оценки m_x принимается такое значение m_x^* , при котором сумма квадратов отклонений результатов измерений от оценки минимальна

$$\sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2 = \min.$$

Дифференцируя это выражение по m_x^* и приравнивая производную нулю, получим оценку m_x^* в виде

$$m_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Примеры распределения случайных величин

Способы нахождения значений случайной величины зависят от вида функции ее распределения. Однако на практике такие функции, как правило, неизвестны. Если же случайный характер результатов наблюдений обусловлен погрешностями измерений, то полагают, что наблюдения имеют нормальное распределение. Это обусловлено тем, что погрешности измерений складываются из большого числа небольших возмущений, ни одно из которых не является преобладающим. Согласно же центральной предельной теореме сумма бесконечно большого числа взаимно независимых бесконечно малых случайных величин с любыми распределениями имеет нормальное распределение. Нормальное распределение для случайной величины x с математическим ожиданием m_x и СКО σ имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}}. \quad (15)$$

Реально даже воздействие ограниченного числа возмущений приводит к нормальному распределению результатов измерений и их погрешностей. В настоящее время наиболее полно разработан математический аппарат именно для случайных величин, имеющих нормальное распределение. Если же предположение о нормальности распределения отвергается, то статистическая обработка наблюдений существенно усложняется и в таком случае невозможно рекомендовать общую методику статистической обработки наблюдений. Часто даже не известно, какая характеристика распределения может служить оценкой истинного значения измеряемой величины.

Выше приведено аналитическое выражение нормального распределения (15) для случайной измеряемой величины x . Переход к нормальному распределению случайных погрешностей $f(\Delta x)$ осуществляется переносом центра распределений в m_x и откладывания по оси абсцисс погрешности $\Delta x = x - m_x$ (рис. 16)

Нормальное распределение характеризуется двумя параметрами: математическим ожиданием m_x и средним квадратическим отклонением σ .

При многократных измерениях несмещенной, состоятельной и эффективной оценкой m_x^* математического ожидания m_x для группы из n наблюдений является среднее арифметическое \bar{x} (12)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

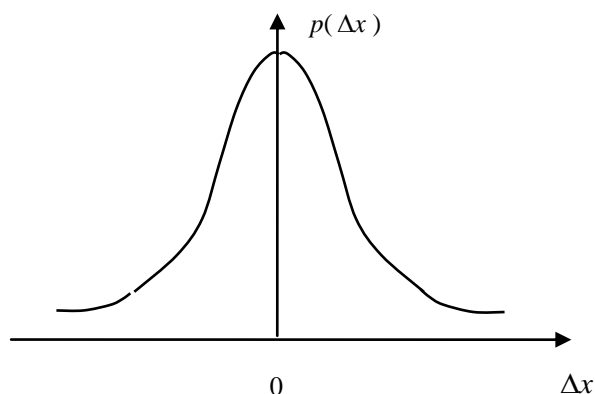


Рис.16 – График плотности распределения случайной погрешности Δx

Нужно сказать, что среднее арифметическое дает оценку математического ожидания результата наблюдений и может быть **оценкой истинного (действительного) значения** измеряемой величины только **после исключения систематических погрешностей**.

СКО является наиболее удобной характеристикой погрешности в случае ее дальнейшего преобразования. Например, для нескольких некоррелированных слагаемых СКО суммы определяется по формуле:

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_x^2}.$$

Оценка S_x среднего квадратического отклонения (СКО) дается формулой:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Оценка S_x характеризует рассеяние единичных результатов наблюдений относительно среднего значения, то есть в случае, если мы за результат измерений примем отдельный исправленный результат наблюдений. Если же в качестве результата измерений принимается среднее арифметическое, то СКО этого среднего $S_{\bar{x}}$ определяется по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

Нормальное распределение погрешностей имеет следующие свойства:

- симметричность, то есть погрешности, одинаковые по величине, но противоположные по знаку, встречаются одинаково часто;
 - математическое ожидание случайной погрешности равно нулю;
- малые погрешности более вероятны, чем большие;
- чем меньше σ , тем меньше рассеяние результатов наблюдений и больше вероятность малых погрешностей.

В метрологии, кроме нормального распространены такие распределения случайной величины, как равномерное, биномиальное, Пуассона, Релея и другие.

Доверительные интервалы

Приведенные выше оценки параметров распределения случайных величин в виде среднего арифметического для оценки математического ожидания и СКО для оценки дисперсии называются точечными оценками, так как они выражаются одним числом. Однако в некоторых случаях знание точечной оценки является недостаточным. Наиболее корректной и наглядной оценкой случайной погрешности измерений является оценка с помощью доверительных интервалов.

Симметричный интервал в границами $\pm \Delta x(P)$ называется **доверительным интервалом** случайной погрешности с доверительной вероятностью P , если площадь кривой распределения между абсциссами $-\Delta x$ и $+\Delta x$ составляет P -ю часть всей площади под кривой плотности распределения вероятностей. При нормировке всей площади на единицу P представляет часть этой площади в долях единицы (или в процентах). Другими словами, в интервале от $-\Delta x(P)$ до $+\Delta x(P)$ с заданной вероятностью P встречаются $P \cdot 100\%$ всех возможных значений случайной погрешности.

Доверительный интервал для нормального распределения находится по формуле:

$$\Delta x(P) = t\sigma,$$

где коэффициент t зависит от доверительной вероятности P .

Для нормального распределения существуют следующие соотношения между доверительными интервалами, выраженными в σ и доверительной вероятностью: 1σ ($P=0,68$), 2σ ($P= 0,95$), 3σ ($P= 0,997$), 4σ ($P=0,999$).

Доверительные вероятности для выражения результатов измерений и погрешностей в различных областях науки и техники принимаются равными. Так, в технических измерениях принята доверительная вероятность 0,95. Лишь для особо точных и ответственных измерений принимают более высокие доверительные вероятности. В метрологии используют, как правило, доверительные вероятности 0,97, в исключительных случаях 0,99. Необходимо отметить, что точность измерений должна соответствовать поставленной измерительной задаче. Излишняя точность ведет к неоправданному расходу средств. Недостаточная точность измерений может привести к принятию по его результатам ошибочных решений с самыми непредсказуемыми последствиями, вплоть до серьезных материальных потерь или катастроф.

При проведении многократных измерений величины x , подчиняющейся нормальному распределению, доверительный интервал может быть построен для любой доверительной вероятности по формуле:

$$\Delta x = t_q \cdot S_{\bar{x}},$$

где t_q – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа наблюдений n и выбранной доверительной вероятности P . Он определяется с помощью таблицы q -процентных точек распределения Стьюдента, которая имеет два параметра: $k=n-1$ и $q=1-P$; $S_{\bar{x}}$ – оценка среднего квадратического отклонения среднего арифметического.

Доверительный интервал для погрешности $\Delta x(P)$ позволяет построить доверительный интервал для истинного (действительного) значения измеряемой величины, оценкой которой является среднее арифметическое \bar{x} . Истинное значение измеряемой величины находится с доверительной вероятностью P внутри интервала: $[\bar{x} - t_q \cdot S_{\bar{x}}; \bar{x} + t_q \cdot S_{\bar{x}}]$. Доверительный интервал позволяет выяснить, насколько может измениться полученная в результате данной серии измерений

оценка измеряемой величины при проведении повторной серии измерений в тех же условиях. Необходимо отметить, что доверительные интервалы строят для неслучайных величин, значения которых неизвестны. Такими являются истинное значение измеряемой величины и средние квадратические отклонения. В то же время оценки этих величин, получаемые в результате обработки данных наблюдений, являются случайными величинами.

Недостатком доверительных интервалов при оценке случайных погрешностей является то, что при произвольно выбираемых доверительных вероятностях нельзя суммировать несколько погрешностей, так как доверительный интервал суммы не равен сумме доверительных интервалов. Суммируются дисперсии независимых случайных величин: $D_{\Sigma} = \sum D_i$. То есть, для возможности суммирования составляющие случайной погрешности должны быть представлены своими СКО, а не предельными или доверительными погрешностями.

Методы обработки результатов прямых измерений

Основные положения методов обработки результатов прямых измерений с многократными наблюдениями определены в ГОСТ 8.207-76.

За результат измерения принимают *среднее арифметическое* данных n наблюдений, из которых исключены систематические погрешности. При этом предполагается, что результаты наблюдений после исключения из них систематических погрешностей принадлежат нормальному распределению. Для вычисления результата измерения следует из каждого наблюдения исключить систематическую погрешность и получить в итоге исправленный результат i -го наблюдения. Затем вычисляется среднее арифметическое этих исправленных результатов, которое принимается за результат измерения. Среднее арифметическое является состоятельной, несмещенной и эффективной оценкой измеряемой величины при нормальном распределении данных наблюдений.

При статистической обработке групп результатов наблюдений следует выполнять следующие операции.

Исключить из каждого наблюдения известную систематическую погрешность и получить исправленный результат отдельного наблюдения x .

Вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Вычислить оценку S_x среднего квадратического отклонения группы наблюдений:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}.$$

Проверить наличие грубых погрешностей – нет ли значений $(x_i - \bar{x})$, которые выходят за пределы $\pm 3S$. При нормальном законе распределений с вероятностью, практически равной 1 (0,997), ни одно из значений этой разности не должно выйти за указанные пределы. Если они имеются, то следует исключить из рассмотрения соответствующие значения x_i и заново повторить вычисления \bar{x} и оценку S_x .

Вычислить оценку СКО $S_{\bar{x}}$ результата измерения (среднего арифметического)

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

Проверить гипотезу о нормальности распределения результатов наблюдений.

Существуют различные приближенные методы проверки нормальности распределения результатов наблюдений. Некоторые из них приведены в ГОСТ 8.207-76. При числе наблюдений меньше 15 в соответствии с этим ГОСТ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют. Доверительные границы случайной погрешности определяют лишь в том случае, если заранее известно, что результаты наблюдений принадлежат этому распределению. Приблизительно о характере распределения можно судить, построив гистограмму результатов наблюдений. Вычислить доверительные границы ε случайной погрешности (случайной составляющей погрешности) результата измерения

$$\varepsilon = t_q S_{\bar{x}},$$

где t_q - коэффициент Стьюдента, зависящий от числа наблюдений и доверительной вероятности. Например, при $n = 14$, $P = 0,95$ $t_q = 2,16$. Значения этого коэффициента приведены в приложении к указанному стандарту.

Вычислить границы суммарной неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерений θ .

Проанализировать соотношение θ и $S_{\bar{x}}$.

Если $\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} < 0,8$, то НСП по сравнению со случайными погрешностями пренебрегают,

и граница погрешности результата $\Delta = \varepsilon$. Если $\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} > 8$, то случайной погрешностью

можно пренебречь, и граница погрешности результата $\Delta = \theta$. Если оба неравенства

не выполняются, то границу погрешности результата находят путем построения

композиции распределений случайных погрешностей и НСП по формуле: $\Delta = K S_{\Sigma}$,

где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной погрешности и НСП;

S_{Σ} - оценка суммарного СКО результата измерения. Оценку суммарного СКО

вычисляют по формуле:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{1/3 \cdot \sum \theta_i^2 + S_{\bar{x}}^2}. \quad (16)$$

Коэффициент K вычисляют по эмпирической формуле:

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S_{\bar{x}} + \sqrt{1/3 \cdot (\sum \theta_i^2)}}.$$

Доверительная вероятность для вычисления θ и ε должна быть одной и той же.

Погрешность от применения последней формулы для композиции

равномерного (для НСП) и нормального (для случайной погрешности)

распределений достигает 12 % при доверительной вероятности 0,99.

Записать результат измерений. Написание результата измерений

предусмотрено в двух вариантах, так как следует различать измерения, когда

получение значения измеряемой величины является конечной целью, и

измерения, результаты которых будут использоваться для дальнейших

вычислений или анализа.

В первом случае достаточно знать общую погрешность результата

измерения и при симметричной доверительной погрешности результаты

измерений представляют в форме:

$$\bar{x} \pm \Delta, P,$$

где x – результат измерения.

Во втором случае должны быть известны характеристики составляющих погрешности измерения – оценка среднего квадратического отклонения результата измерения $S_{\bar{x}}$, границы НСП θ , число выполненных наблюдений n .

При отсутствии данных о виде функций распределения составляющих погрешности результата и необходимости дальнейшей обработки результатов или анализа погрешностей, результаты измерений представляют в форме:

$$\bar{x}; S_{\bar{x}}, n, \theta.$$

Если границы НСП вычислены, то дополнительно указывают доверительную вероятность P .

Однократные измерения

В технике большинство измерений являются однократными, то есть для получения результата измерения используется одно показание прибора. Результат однократного измерения включает в себя все присущие ему погрешности (инструментальную, методическую, субъективную), в каждой из которых могут быть как систематические, так и случайные составляющие. Если при этом необходимо точно оценить погрешность результата измерений, то следует выявить и оценить все составляющие погрешностей и просуммировать их.

Случайная составляющая погрешности не может быть рассчитана по результатам измерения, хотя она неявно присутствует в нем. В качестве оценки случайной составляющей погрешности может быть использован, например, **коэффициент вариации**, определяемый предварительно в процессе многократных измерений при изучении воспроизводимости показаний данного прибора. Коэффициент вариации находится как отношение оценки среднего квадратического отклонения к среднему арифметическому показаний прибора при многократных измерениях. В некоторых случаях случайная погрешность может определяться доверительными границами.

Оценку систематических погрешностей можно получить по характеристикам используемого прибора (по паспортным данным или из

свидетельства о поверке) и метода измерения (путем его анализа). Из документации на прибор можно оценить и учесть дополнительные систематические погрешности.

Основные этапы оценки погрешности при однократных измерениях с точным оцениванием погрешности следующие.

1. Учитывается систематическая погрешность прибора.
2. Оценивается систематическая погрешность метода измерений.
3. Оцениваются по документации на прибор дополнительные систематические погрешности, обусловленные влияющими величинами.
4. Из отсчета прибора исключаются все известные систематические погрешности и определяется исправленный результат измерения, который содержит НСП и случайные составляющие погрешности.
5. Оцениваются границы θ_i составляющих НСП, распределение которых принимается равномерным. Ими могут быть, например, погрешности эталонов при поверке СИ, погрешности поправок и т.п. После этого определяются границы θ суммарной НСП по приведенным выше формулам.
6. Предварительно перед использованием прибора определяется коэффициент вариации – оценка случайной погрешности, которая используется при последующих однократных измерениях с прибором.
7. Сопоставляются оценки НСП и случайной погрешности по критериям предыдущего раздела и при возможности пренебрежения какой-либо из них определяются границы погрешности результата Δ .

Если необходимо учитывать обе составляющие, то в качестве границы погрешности результата измерения Δ принимается суммарная средняя квадратическая погрешность S_{Σ} , вычисляемая по формуле (16) с определением СКО результата измерений и полуэмпирического коэффициента K . Для исключения грубых погрешностей однократное измерение следует повторять 2-3 раза и за результат принимать среднее арифметическое.

На практике часто встречаются измерения, для которых нет необходимости точно оценивать погрешность. В таких измерениях в качестве результата принимают значение отсчета x , а для оценивания погрешности измерения

используются предел допускаемой основной погрешности прибора $\Delta_{\text{пр}}$ и дополнительные погрешности прибора $\Delta_{\text{доп.}i}$ от влияющих величин. Субъективные погрешности при этом считаются малыми и ими пренебрегают.

Оценка погрешности результата измерения Δ_{Σ} определяется как сумма абсолютных величин основной погрешности и суммарной систематической по формуле:

$$\Delta_{\Sigma} = |\Delta_{\text{пр}}| + \sum |\Delta_{\text{доп.}i}|.$$

Определение результатов косвенных измерений и оценивание их погрешностей

Методы обработки результатов косвенных измерений изложены в Методических указаниях РД 50-555-85 «Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей».

Основные этапы обработки результатов косвенных измерений следующие.

1. Искомое значение величины Y находят на основании результатов измерений аргументов $x_1, \dots, x_i, \dots, x_m$, связанных с искомой величиной нелинейной зависимостью

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m).$$

Вид функции f должен быть известен из теоретических предпосылок или установлен экспериментально. Погрешность неизвестной величины Y зависит от погрешностей измерения аргументов. Ниже рассматривается случай, когда аргументы независимы друг от друга.

2. Оценка СКО случайной погрешности $S(Y)$ вычисляют по формуле:

$$S(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2 \cdot S_{x_i}^2},$$

где x_i – результат измерения i -го аргумента; S_{x_i} – оценка СКО результата измерения x_i -го аргумента (определяется по формулам 12,13).

3. Доверительные границы случайной погрешности ε , при условии, что распределение погрешностей результатов измерений аргументов не противоречит нормальному распределению, определяют по формуле:

$$\varepsilon = t_q \cdot S(Y)$$

4. Границу НСП результата измерения вычисляют по формуле

$$\theta = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 \cdot \vartheta_i^2},$$

где k – поправочный коэффициент для принятой доверительной вероятности и числа m составляющих НСП, для $P=0,95$ коэффициент $k = 1,1$.

5. Погрешность результата измерения вычисляют в зависимости от соотношения границ НСП и случайной погрешности. При $0,8 \left(\frac{\theta}{S(Y)}\right) < 8$ доверительную границу результата косвенного измерения Δ вычисляют по формуле $\Delta = K[\varepsilon +]\theta$ где K – коэффициент, зависящий от отношения $\theta/S(Y)$ и доверительной вероятности (значения K приведены в указанных РД).

6. Результат измерений вычисляется по приведенной выше формуле. Если предполагается исследование и сопоставление результатов измерений или анализ погрешностей, то результат измерения и его погрешность представляют в виде

$$Y, S(Y), n, \theta.$$

Если границы погрешности результата измерения симметричны, то результат измерения и его погрешность представляют в виде $Y \pm \Delta$.

При неизвестных распределениях погрешностей измерений аргументов и при наличии корреляции между ними результат косвенного измерения и его погрешность определяются методом приведения, основанном на приведении ряда отдельных значений косвенно измеряемой величины к ряду прямых измерений.

Записи погрешностей и правила округления

Для единообразия выражения результатов измерений и погрешностей формы их представления стандартизируются. Основные правила при этом следующие.

Так как погрешности определяют лишь зону недоверности результата измерений, знать их очень точно не требуется. Поэтому в окончательной записи погрешность выражается **одной или двумя значащими цифрами**.

Установлены следующие правила округления результатов и погрешностей измерений.

Результат измерения округляется так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение его погрешности. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то их отбрасывают только до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности. Например, результат 3, 2800 при погрешности 0,001 округляют до 3,280.

Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остающиеся цифры числа не изменяют, лишние цифры в целых числах заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают. Например, число 267 245 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 267 200; число 165,245 до 165,2.

Если цифра старшего отбрасываемого разряда больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу: 14597→14600; 123,58→124;

Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или равны нулю, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают, если она нечетная: 10,5→10; 11,5→12.

Литература: [2. с.51-81]; [3. с.257-290]; [5. с.37-38]; [7. с.51-98, 115,116].

Методические указания

При изучении этого раздела необходимо изучить природу возникновения случайных погрешностей, методы вероятностного описания погрешностей результатов измерений. Для этого нужно вспомнить методы теории вероятностей и математической статистики, которые позволяют установить вероятностные (статистические) закономерности случайных погрешностей и на основании этих закономерностей дать количественные оценки результатов измерений и его случайной погрешности. Уясните, какие числовые характеристики распределений используют на практике для определения погрешностей. Вы должны четко представлять, как на основании полученной в эксперименте группы результатов наблюдений оценить истинное значение измеряемой физической величины, то есть найти результат измерений; как оценить его точность (меру его приближения к истинному значению); каким образом определяются числовые оценки

параметров соответствующих законов распределения случайной величины на основании выборки; что такое интервальные и точечные оценки.

Вопросы для самопроверки

1. Почему при повторении процедуры измерения отсчет x по шкале отношений получается все время разным?
2. Какие законы распределения случайных величин Вы знаете? Отобразите их в аналитической форме и в виде графиков. Поясните смысл всех переменных, входящих в эти выражения.
3. Какой вид имеет плотность вероятности распределения результата измерения для нормального закона?
4. Что такое моменты случайных величин? Поясните физический смысл начального момента и центральных моментов k -го порядка.
5. Что такое оценка измеряемой ФВ?
6. Какие точечные оценки Вам известны? Перечислите их свойства и методы получения?
7. В чем заключается интервальное оценивание? Дайте определение доверительному интервалу и доверительной вероятности.
8. Перечислите методы обработки результатов измерений.
9. Каковы особенности обработки результатов измерений при прямых и косвенных измерениях?
10. Перечислите правила округления результатов измерений, приведите примеры.

2.6. КОНЦЕПЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В 2003г. введены в действие Рекомендации по межгосударственной стандартизации **РМГ 43-2001 «Применение «Руководства» по выражению неопределенности измерений»**. Они распространяются на методы оценивания точности результатов измерений, содержат практические рекомендации по применению Руководства и показывают соответствие между формами представления результатов измерений с использованием погрешности и

неопределенности измерений. Причин появления концепции неопределенности измерений довольно много.

В Руководстве вместо понятия «**погрешность измерения**» вводится понятие «**неопределенность измерения**».

Неопределенность измерения – параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию (разброс) значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Неопределенность измерения обычно имеет много составляющих. Неопределенность результата измерения отражает отсутствие точного знания значения измеряемой величины. Оно даже после внесения поправки на известные систематические погрешности все еще является только **оценкой** измеряемой величины вследствие неопределенности, возникающей из-за случайных эффектов и неточной поправки результата на систематические погрешности.

Водятся две оценки неопределенности:

- оценка по типу А – метод оценивания неопределенности путем статистического анализа рядов наблюдений;
- оценка по типу В – метод оценивания иным способом, чем статистический анализ рядов наблюдений.

Целью классификации на тип А и тип В является показ двух различных способов оценки составляющих неопределенности.

Стандартную неопределенность типа А получают из функции плотности вероятности, полученной из наблюдаемого распределения по частоте.

Стандартную неопределенность типа В получают из предполагаемой функции плотности вероятностей, основанной на уверенности в том, что событие произойдет. Эта вероятность часто называется субъективной вероятностью.

2.6.1 Оценивание и выражение неопределенности

1. Выразить математическую зависимость между измеряемой величиной Y и входными величинами x_i , от которых она зависит.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Функция f должна содержать каждую величину, включая все поправки и поправочные множители, которая может дать значительную составляющую в неопределенность результата измерения.

2. Определить x_i^* – оцененное значение входной величины x_i либо на основе статистического анализа рядов наблюдений, либо другими способами.
3. Оценить стандартную неопределенность $u(x_i^*)$ каждой входной оценки x_i^* либо по типу А, либо по типу В.

Стандартную неопределенность единичного измерения i -й входной величины $u_{A,i}$ вычисляют по формуле:

$$u_{A,i} = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2},$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$ – среднее арифметическое i -й входной величины.

Стандартную неопределенность $u_A(x_i)$ измерений i -й входной величины, при которой результат определяют как среднее арифметическое, вычисляют по формуле:

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}.$$

Часто приходится оценивать стандартную неопределенность по типу В $u(x)$, связанную с влияющим фактором x , значения которого находятся в заданных пределах от $-\Delta \leq x \leq +\Delta$. По имеющейся информации о величине x необходимо принять некоторое априорное распределение вероятности возможных значений x внутри заданных пределов. После этого стандартная определяется как $u(x) = \Delta/K$, где коэффициент K зависит от принятой функции распределения.

Наиболее типичными случаями при этом являются:

- известны только пределы, в которых может находиться значение x , то есть 2Δ ;
- известно значение $x_{изв}$ и пределы, обычно симметричные, допускаемых значений $\pm\Delta$;
- известен интервал от $(x_{изв} - \Delta_p)$ до $(x_{изв} + \Delta_p)$, охватывающий заданную долю p вероятности.

В первом случае в предположении равномерного распределения значение коэффициента K может быть принято для симметричных границ равным $\sqrt{3}$.

Во втором случае из-за известного значения $x_{\text{изв}}$ можно предположить, что вероятность нахождения x вблизи $x_{\text{изв}}$ больше, чем вблизи границ $x_{\text{изв}} \pm \Delta$. То есть можно принять треугольное распределение вероятности в качестве некоторого среднего между равномерным (прямоугольным) и нормальным. Значение коэффициента K при этом равно $\sqrt{6}$.

В третьем случае распределение вероятности принимается нормальным и значение коэффициента K зависит от заданной вероятности. Например, для $P=0,99$ он равен 2,58.

4. Рассчитать результат измерения, то есть оценку Y^* измеряемой величины Y из функциональной зависимости f , используя полученные оценки входных величин x_i^* .
5. Определить суммарную стандартную неопределенность $u_c(Y^*)$ результата измерения Y^* из стандартных неопределенностей, связанных с входными оценками.

Суммарная стандартная неопределенность для некоррелированных входных оценок определяется из формулы:

$$u_c(Y^*) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}.$$

В этой формуле неопределенность u может определяться как по типу А, так и по типу В.

6. При необходимости дать расширенную неопределенность. **Расширенная неопределенность** используется для выражения неопределенности результата измерения в торговле, промышленности, регулирующих актах, при охране здоровья и безопасности в качестве дополнительной меры неопределенности. Расширенную неопределенность U получают путем умножения суммарной стандартной неопределенности $u_c(Y^*)$ на **коэффициент охвата** k :

$$U = k u_c(Y^*).$$

Тогда результат измерения выражается как $Y = Y^* \pm U$. Это означает, что наилучшей оценкой значения, приписываемого величине Y , является Y^* и что интервал от $Y^* - U$ до $Y^* + U$ содержит, как можно ожидать, большую часть

распределения значений, которые можно с достаточной уверенностью приписать Y .

Например, значения коэффициента охвата, который создает интервал, имеющий уровень доверия P при допущении нормального распределения, имеют следующие значения:

уровень доверия P , %	коэффициент охвата k
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

2.6.2 Сопоставление концепций погрешности и неопределенности измерений

Концепции погрешности и неопределенности измерений преследуют **единую цель** – количественно охарактеризовать результат измерения с точки зрения его точности. В обеих концепциях прослеживается **единая схема** оценки характеристик погрешности и неопределенности измерения: начиная с анализа измерительной задачи и уравнения измерения, выявления всех источников погрешности (неопределенности) результата измерения, введения поправок на все известные систематические эффекты (погрешности) и, наконец, оценивания характеристик составляющих погрешности (стандартных неопределенностей) и вычисление характеристики погрешности (неопределенности) результата измерения.

В общем случае нет однозначного соответствия между случайными погрешностями и неопределенностями, вычисленными по типу А, а также между НСП и неопределенностями, вычисленными по типу В. Деление на случайные и систематические погрешности обусловлено природой их появления и свойствами, которые проявляются в процессе измерений. Деление же неопределенностей на тип А и В обусловлено методами их расчета.

Следует отметить, что несомненным достоинством концепции неопределенности измерений является единый принцип использования стандартной неопределенности для всех составляющих погрешности, что привлекательно для практического использования.

2.6.2 Использование концепции неопределенности

В связи с появлением Руководства и ряда отечественных документов по использованию неопределенности измерений, возникает вопрос, следует ли полностью отказаться от концепции погрешности измерений и перейти на принципы, изложенные в Руководстве. Среди метрологов нет единого мнения в этом вопросе. Так, в упомянутом выше РМГ 43-2001 говорится, что концепцией неопределенности целесообразно пользоваться при проведении совместных работ с зарубежными странами, при подготовке публикаций в зарубежной печати и при выполнении международных метрологических работ.

Кроме того, ряд авторов предлагает, что для тех видов и групп средств измерений, которые обеспечены поверочными схемами, восходящими к государственным эталонам, возможно сохранить концепцию погрешности измерений. Это объясняется тем, что величины, воспроизводимые эталонами, имеют наивысшую на данный момент времени точность и воспринимаются как истинные значения величин.

Для тех же видов и средств измерений, которые не обеспечены государственными эталонами и поверочными схемами, можно использовать концепцию неопределенности измерений и разрабатывать документацию в соответствии с Руководством.

Литература: [3. с. 283-291]; [7. с. 70-81].

Методические указания

В данном разделе Вам необходимо познакомиться с общей концепцией неопределенности, их видами, способами расчета, уметь провести сопоставление концепций погрешности и неопределенности измерений

Вопросы для самопроверки

1. Чем вызвано появление появления концепции неопределенности измерений?
2. Перечислите последовательность оценивания и выражения неопределенности.
3. В каких случаях рассчитывают расширенную неопределенность?

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

В течение семестра каждый студент должен выполнить одну или две контрольные работы по указанию преподавателя. По результатам выполнения контрольного задания проверяется качество усвоения студентом той части лекционного материала, которая связана с расчетом разных видов погрешностей и обработкой результатов наблюдений при многократных измерениях.

Выполнять контрольные работы следует только после того, как проработан соответствующий раздел курса. При выполнении задания необходимо привести теоретическое обоснование используемых расчетных формул и дать письменное разъяснение используемых в них буквенных обозначений. Только после этого в формулы следует подставлять значения соответствующих величин. Зачет по контрольной работе проводится в процессе собеседования с преподавателем в период зачетно-экзаменационной сессии. При условии успешной защиты контрольной работы и лабораторного практикума студент допускается к экзамену.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 1

Расчет значений абсолютных, относительных и приведенных основных погрешностей измерений для различных типов приборов.

Контрольная работа №1 включает в себя три задачи.

Задача 1

Для прибора с преобладающими аддитивными погрешностями рассчитать значения абсолютных, относительных и приведенных основных погрешностей измерений. Результаты представить в виде таблицы и графиков. Исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

№ варианта	Диапазон измерений x	класс точности	результаты измерений x
1	(0...10) В	0,1	0; 1; 2; 4; 5; 6; 8;10 В
2	(0...10) В	0,15	0; 1; 2; 4; 5; 6; 8;10 В
3	(0...10) В	0,25	0; 1; 2; 4; 5; 6; 8;10 В
4	(0...10) В	0,4	0; 1; 2; 4; 5; 6; 8;10 В
5	(0...10) В	0,5	0; 1; 2; 4; 5; 6; 8;10 В
6	(0...100) мВ	0,6	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мВ
7	(0...100) мВ	1,0	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мВ
8	(0...100) мВ	1,5	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мВ
9	(0...100) мВ	2,5	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мВ
10	(0...100) мВ	4,0	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мВ
11	(0...5) А	0,1	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
12	(0...5) А	0,15	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
13	(0...5) А	0,25	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
14	(0...5) А	0,4	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
15	(0...5) А	0,5	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
16	(0...100) мА	0,6	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мА
17	(0...100) мА	1,0	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мА

18	(0...100) МА	1,5	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 МА
19	(0...100) МА	2,5	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 МА
20	(0...100) МА	4,0	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 МА

Пример решения задачи.

Дано: амперметром класса точности 2,0 со шкалой 0...50 А измерены значения тока 0, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50 А.

Рассчитать: зависимости абсолютной, относительной и приведенной основных погрешностей от результата измерений. Результаты представить в виде таблицы и графиков.

Решение.

Для записи результатов формируем таблицу (см. табл. 2).

Таблица 2 – Результаты расчета значений погрешности

Результаты измерений I, A	Значение рассчитанных погрешностей		
	Абсолютной $\Delta I, A$	Относительной $\delta I, \%$	Приведенной $\gamma I, \%$
1	2	3	4
0	± 1	$\pm \infty$	± 2
5	± 1	± 20	± 2
10	± 1	± 10	± 2
20	± 1	± 5	± 2
25	± 1	± 4	± 2
30	± 1	± 3.33	± 2
40	± 1	± 2.5	± 2

50	±1	±2	±2
----	----	----	----

В первый столбец записываем заданные в условии задачи значения тока I . Класс точности прибора задан числом без кружка, следовательно, приведенная погрешность, выраженная в процентах, во всех точках шкалы не должна превышать по модулю класса точности, то есть $|\gamma I| \leq 2\%$. При решении задачи рассмотрим худший случай $|\gamma I| = 2\%$, когда приведенная погрешность принимает максимальное по абсолютной величине значение. Данные значения погрешности заносим в столбец 4 табл.2. Рассчитаем значения абсолютной погрешности. Из формулы

$$\gamma I = \frac{\Delta I}{I_N} 100\%.$$

Выражаем абсолютную погрешность

$$\Delta I = \frac{\gamma I \cdot I_N}{100\%}.$$

За нормирующее значение принимаем размах шкалы $I_N = 50\text{A}$, так как шкала амперметра содержит нулевую отметку. Абсолютная погрешность равна $\pm 1\text{A}$ во всех точках шкалы прибора. Заносим данное значение во второй столбец таблицы. Значения относительной погрешности для всех измеренных значений тока I будем рассчитывать по формуле

$$\delta I = \frac{\Delta I}{I} 100\%.$$

Результаты вычислений заносим в столбец 3 табл.2.

По данным табл. 2, учитывая, что погрешности могут быть как положительными, так и отрицательными, необходимо построить графики зависимости абсолютной, относительной и приведенной погрешностей от результатов измерений I .

Задача 2

Для прибора с преобладающими мультипликативными погрешностями рассчитать зависимость абсолютных и относительных основных погрешностей от результата измерений. Результаты представить в виде таблицы и графиков. Исходные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчета

№ варианта	Класс точности	Результаты измерений x
1	0,1 в ружке	0; 100;200; 400;500; 600;800; 1000 Ом
2	0,4	0; 100;200; 400;500; 600;800; 1000 Ом
3	0,5	0; 100;200; 400;500; 600;800; 1000 Ом
4	0,6	0; 100;200; 400;500; 600;800; 1000 Ом
5	1,0	0; 100;200; 400;500; 600;800; 1000 Ом
6	1,5	0; 25; 50;100; 125;150; 200;250 °C
7	2,5	0; 25; 50;100; 125;150; 200;250 °
8	4,0	0; 25; 50;100; 125;150; 200;250 °C
9	0,1	0; 25; 50;100; 125;150; 200;250 °C
10	0,4	0; 25; 50;100; 125;150; 200;250 °C
11	0,1	0; 10;20; 40;50; 60;80; 100мВ
12	1,5	0; 10;20; 40;50; 60;80; 100 мВ
13	2,5	0; 10;20; 40;50; 60;80; 100 мВ
14	4,0	0; 10;20; 40;50; 60;80; 100 мВ
15	0,1	0; 10;20; 40;50; 60;80; 100 мВ

16	0,4	0; 10;20; 40;50; 60;80; 100 мА
17	0,5	0; 10;20; 40;50; 60;80; 100 мА
18	0,6	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мА
19	1,0	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мА
20	1,5	0; 10; 20; 40; 50;60; 80; 100 мА

Пример решения

Дано: вольтметром класса точности 0,5 со шкалой (0...100) В измерены значения напряжения 0, 10, 20, 40, 50, 60, 80, 100 В.

Рассчитать: зависимости абсолютной и относительной погрешностей от результата измерений. Результаты представить в виде таблицы и графиков.

Решение.

Для записи результатов формируем таблицу (см. табл. 4).

Таблица 4 – Результаты расчета значений погрешности

Результаты измерений U , В	Значение рассчитанных погрешностей	
	Абсолютной ΔU , В	Относительной δU , %
1	2	3
0	0	0,5
10	0,05	0,5
20	0,1	0,5
40	0,2	0,5
50	0,25	0,5
60	0,3	0,5
80	0,4	0,5
100	0,5	0,5

Для записи результатов формируем таблицу (табл. 4), в столбцы которой будем записывать измеренные значения U , абсолютные ΔU и относительные δU погрешности. В первый столбец записываем заданные в условии задачи измеренные значения тока: 0, 10, 20, 40, 50, 60, 80, 100 В. Класс точности вольтметра задан числом в кружке, следовательно, относительная погрешность, выраженная в процентах, во всех точках шкалы не должна превышать по модулю класса точности, т.е. $|\delta V| \leq 0,5 \%$.

При решении задачи рассмотрим худший случай, т.е. $|\delta U| = 0,5\%$, что соответствует значениям $\delta U = +0,5 \%$ и $\delta U = -0,5 \%$. Примем во внимание опыт решения задачи 5.2, из которого видно, что результаты вычисления, выполненные для положительных и отрицательных значений погрешностей, численно совпадают друг с другом и отличаются только знаками "+" или "-". Поэтому дальнейшие вычисления будем производить только для положительных значений относительной погрешности $\delta U = 0,5 \%$, но при этом будем помнить, что все значения второго и третьего столбцов табл. 4 могут принимать и отрицательные значения. Значение относительной погрешности $\delta U = 0,5\%$ заносим в третий столбец таблицы.

Из формулы

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U} 100\%.$$

Выразим абсолютную погрешность

$$\Delta U = \frac{\delta U \cdot U}{100\%}.$$

Рассчитаем значения абсолютных погрешностей и занесем их во второй столбец. По данным табл. 4, учитывая, что погрешности могут быть как положительными, так и отрицательными, легко построить графики зависимостей абсолютной ΔU и относительной δU погрешностей от результата измерений U .

Задача 3

Для цифрового измерительного прибора рассчитать зависимость абсолютных и относительных основных погрешностей от результата измерений. Результаты

представить в виде таблицы и графиков. Исходные данные представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Исходные данные для расчета

№ варианта	Диапазон измерений	Класс точности	Результаты измерений
1	(-100...+100) мА	0,1/0,05	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100 мА
2	(-100...+100) мА	0,25/0,1	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100 мА
3	(-100...+100) мА	0,5/0,25	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100 мА
4	(-100...+100) мА	1,0/0,5	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100 мА
5	(-100...+100) мА	1,5/1,0	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100 мА
6	(-5...+5) А	2,5/1,5	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
7	(-5...+5) А	4,0/2,5	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
8	(-5...+5) А	0,1/0,05	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
9	(-5...+5) А	0,25/0,1	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
10	(-5...+5) А	0,5/0,25	0; 0,5; 1,0; 1,5;2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А
11	(-10...+10) В	1,0/0,5	0; 1; 2; 4; 5;6;8; 10 В
12	(-10...+10) В	1,5/1,0	0; 1; 2; 4; 5;6;8; 10 В
13	(-10...+10) В	2,5/1,5	0; 1; 2; 4; 5;6;8; 10 В
14	(-10...+10) В	4,0/2,5	0; 1; 2; 4; 5;6;8; 10 В
15	(-10...+10) В	0,1/0,05	0; 1; 2; 4; 5;6;8; 10 В
16	(0...100) °С	0,25/0,1	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100°С
17	(0...100) °С	0,5/0,25	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100°С
18	(0...100) °С	1,0/0,5	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100°С

19	$(0...100) ^\circ C$	1,5/1,0	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100 $^\circ C$
20	$(0...100) ^\circ C$	2,5/1,5	0; 10; 20; 40;50; 60; 80; 100 $^\circ C$

Пример решения

Дано: цифровым омметром класса точности 1,0/0,5 со шкалой 0...1000Ом измерены значения сопротивления 0, 100, 200, 400, 500, 600, 800, 1000 Ом.

Рассчитать зависимости абсолютной и относительной основных погрешностей от результата измерений. Результаты представить в виде таблицы и графиков.

Решение.

Для записи результатов формируем таблицу (см. табл. 6).

Таблица 6 – Результаты расчета значений погрешности

Результаты измерений U , В	Значение рассчитанных погрешностей	
	Абсолютной ΔU , В	Относительной δU , %
1	2	3
0	5,0	∞
100	5,5	5,5
200	6,0	3,0
400	7,0	1,75
500	7,5	1,5
600	8,0	1,33
800	9,0	1,125
1000	10,0	1,0

В первый столбец записываем заданные в условии задачи измеренные значения сопротивления: 0, 100, 200, 400, 500, 600, 800, 1000 Ом.

Класс точности вольтметра задан в виде двух чисел, разделенных косой чертой. Следовательно, относительная погрешность, выраженная в процентах, во всех точках шкалы должна удовлетворять следующему соотношению:

$$\delta R \leq [a + b(|R_k/R| - 1)], \%$$

В данном случае, $a = 1,0$; $b = 0,5$; $R_k = 1000$ Ом, причем параметры этой формулы a и b ответственны, соответственно, за мультипликативную и аддитивную составляющие суммарной погрешности. Таким образом, получаем

$$\delta R \leq [1,0 + 0,5(|1000/R| - 1)], \%$$

При решении задачи рассмотрим худший случай

$$\delta R = [1,0 + 0,5(|1000/R| - 1)],$$

что соответствует значениям

$$\delta R = \pm [1,0 + 0,5(|1000/R| - 1)].$$

Примем во внимание опыт решения задачи 1, из которого видно, что результаты вычисления, выполненные для положительных и отрицательных значений погрешностей, численно совпадают друг с другом и отличаются только знаками "+" или "-", поэтому дальнейшие вычисления будем производить только для положительных значений относительной погрешности $\delta R = [1,0 + 0,5(1000/R - 1)]$, но при этом будем помнить, что все значения второго и третьего столбцов табл. 6 могут принимать и отрицательные значения.

Рассчитаем значения относительной погрешности.

При $R = 0$ Ом $\delta R = [1,0 + 0,5(1000/0 - 1)] \rightarrow \infty$; при $R = 100$ Ом $\delta R = [1,0 + 0,5(1000/100 - 1)] = 5,5 \%$.

Значения относительной погрешности для остальных измеренных значений сопротивления рассчитываются аналогично. Полученные значения относительной погрешности заносим в третий столбец табл. 6.

Рассчитаем значения абсолютной погрешности.

Из формулы

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R}$$

выражаем абсолютную погрешность

$$\Delta R = \frac{\delta R \cdot R}{100\%}$$

При $R = 0$ Ом получаем

$$\Delta R = \frac{\infty \cdot 0}{100\%}$$

ΔR – неопределенность.

Искомое значение ΔR можно определить следующим образом. Так как класс точности прибора задан в виде двух чисел, то у данного прибора аддитивные и мультипликативные погрешности соизмеримы. При $R=0$ Ом мультипликативная составляющая погрешность равна нулю, значит, общая погрешность в этой точке обусловлена только аддитивной составляющей. Аддитивную составляющую представляет второе из чисел, задающих класс точности, то есть в данном случае число $b = 0,5$. Это означает, что аддитивная погрешность составляет 0,5 % от верхнего предела измерений прибора, то есть от $R_k=1000$ Ом.

Таким образом, при $R = 0$ имеем

$$\Delta R = \frac{bR_k}{100\%} = \frac{0.5\% \cdot 100}{100\%} = 5 \hat{I} \text{ } \grave{\text{a}} .$$

При $R = 100$ Ом получаем 5,5 Ом.

Значения абсолютной погрешности для остальных измеренных значений сопротивления рассчитываются аналогично. Полученные таким образом значения абсолютной погрешности заносим во второй столбец табл. 6.

По данным табл. 6, учитывая, что погрешности могут быть как положительными, так и отрицательными, можно построить графики зависимостей абсолютной ΔR и относительной δR погрешностей от результата измерений R .

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2

Определение числовых оценок параметров при обработке многократных
неравноточных измерений

После проведения трех групп неравноточных измерений по результатам обработки данных для каждого ряда измерений получены значения среднего арифметического $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ и СКО $\sigma_{x1}, \sigma_{x2}, \sigma_{x3}$ представленные в табл. 7. Рассчитать среднее взвешенное \bar{x}_0 и погрешность среднего взвешенного $S_{\bar{x}_0}$.

Таблица 7 – Исходные данные для определения среднее взвешенного \bar{x}_0 и погрешности среднего взвешенного $S_{\bar{x}_0}$

№ варианта	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}
1	100,1	100,2	100,25	0,6	0,9	0,8
2	100,1	100,2	100,25	0,9	0,8	0,7
3	100,1	100,2	100,25	0,8	0,7	0,9
4	100,1	100,2	100,25	0,5	0,9	0,8
5	100,1	100,2	100,25	0,7	0,9	0,6
6	200,2	200,1	200,15	0,6	0,9	0,8
7	200,2	200,1	200,15	0,9	0,8	0,7
8	200,2	200,1	200,15	0,8	0,7	0,9
9	200,2	200,1	200,15	0,5	0,9	0,8
10	200,2	200,1	200,15	0,7	0,9	0,6
11	300,25	300,53	300,5	0,6	0,9	0,8
12	300,25	300,53	300,5	0,9	0,8	0,7
13	300,25	300,53	300,5	0,8	0,7	0,9
14	300,25	300,53	300,5	0,5	0,9	0,8

15	300,25	300,53	300,5	0,7	0,9	0,6
16	400,4	400,5	400,2	0,6	0,9	0,8
17	400,4	400,5	400,2	0,9	0,8	0,7
18	400,4	400,5	400,2	0,8	0,7	0,9
19	400,4	400,5	400,2	0,5	0,9	0,8
20	400,4	400,5	400,2	0,7	0,9	0,6

Методические указания.

Ранее мы рассматривали равноценные измерения, в которых одинаково доверяли результату любого единичного измерения. Это было условие применения теории вероятностей. На практике не всегда можно обеспечить полную воспроизводимость условий повторных измерений. При проведении нескольких серий измерений некоторые оказываются менее надежными. При рассмотрении результатов разных серий измерения может обнаружиться, что результаты некоторых серий менее однородны (т.е. имеют больший разброс). Эти результаты заслуживают меньшего доверия, и это можно учесть, уменьшив их “вес” в совокупности результатов всех измерений [5. с.38-43]. Понятие “вес” отражает степень доверия к результату измерения. Чем больше, тем лучше. В этом случае значение измеряемой величины, наиболее близкое к истинному ее значению, определяется по формуле

$$\bar{x}_0 = \frac{\bar{x}_1 p_1 + \bar{x}_2 p_2 + \dots + \bar{x}_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n},$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – средние значения для отдельных групп измерений, p_1, p_2, \dots, p_n – их вес.

Значение \bar{x}_0 – называют средним взвешенным.

Наиболее правильным значением веса для данного результата является его плотность вероятности. Числовые значения веса устанавливают, учитывая

условия измерения. Рассмотрим некоторые из них. Вес в отличие от плотности вероятности обозначим p^* .

Определение “веса” результата.

В основу вычисления могут быть взяты средние квадратические погрешности. Веса соответствующих групп измерений считают обратно пропорциональными квадратам σ , т.е. дисперсиям.

$$p_1^* : p_2^* : p_3^* : \dots : p_n^* = \frac{1}{\sigma_1^2} : \frac{1}{\sigma_2^2} : \frac{1}{\sigma_3^2} : \dots : \frac{1}{\sigma_n^2}.$$

Или другими словами, в случае неравноточных измерений за оценку математического ожидания принимают средневзвешенное арифметическое значение

$$m_X^* = \frac{\sum_{i=1}^n g_i x_i}{\sum_{i=1}^n g_i},$$

где g_i – вес i -го измерения; обычно принимают $g_i = 1/\sigma_i^2$, здесь σ_i^2 – дисперсия i -го результата, определяемая точностью измерения (прибора и метода).

Аналогично за точечную оценку дисперсии при неравноточных измерениях принимают

$$S_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i (x_i - m_X^*)^2}{\sum_{i=1}^n g_i}.$$

Пример. Были проведены три группы измерений тремя наблюдателями. После обработки каждого ряда измерений были получены следующие результаты:

$$\bar{x}_1 = 20000,45 \text{ --- } \tilde{\sigma}_1 = \pm 0,05;$$

$$\bar{x}_2 = 20000,15 \text{ --- } \tilde{\sigma}_2 = \pm 0,20;$$

$$\bar{x}_3 = 20000,60 \text{ --- } \tilde{\sigma}_3 = \pm 0,10.$$

Определяем отношения весов:

$$p_1^* : p_2^* : p_3^* = \frac{1}{(0,05)^2} : \frac{1}{(0,2)^2} : \frac{1}{(0,1)^2} = 400 : 25 : 100 = 16 : 1 : 4.$$

В соответствии с этой пропорцией, принимаем $p_1^* = 16, p_2^* = 1, p_3^* = 4$.

Среднее взвешенное будет равно

$$\bar{x}_0 = \frac{16 \cdot 20000,45 + 1 \cdot 20000,15 + 4 \cdot 200000,60}{16 + 1 + 4} = 20000,46.$$

Другим критерием для определения весов результатов нередко принимают число измерений n в каждой группе (при $\sigma = const$). В этом случае среднее взвешенное будет равно среднему из всех измерений, рассматриваемых как один ряд.

Оценка погрешности среднего взвешенного.

$$S_{\bar{x}_0} = \sqrt{\frac{\sum (p_i^* u_i^2)}{m(m-1) \sum p^*}},$$

где $\sum p^*$ - сумма весов всех результатов; p_i^* - вес каждого результата измерения x_i ; u_i - разность $x_i - \bar{x}_0$ (\bar{x}_0 - среднее взвешенное); m - число результатов измерений.

ОТЧЕТ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ДОЛЖЕН СОДЕРЖАТЬ:

1. Титульный лист.
2. Вариант задания.
3. Решение задач с приведением формул, примеров расчета, графиков.

Библиографический список

1. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология, ч. I Общая теория измерений: М. «Питер». 2010 г. с.192
2. Мокров Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебное пособие: Дубна, 2007г. с. 131

3. Окрепилов В.В. Основы метрологии: учебное пособие / В.В. Окрепилов. – СПб.: ГУАП, 2008.с.380/ ISBN 978-5-8088-0376-3
4. Метрология и радиоизмерения под редакцией В.И. Нефедова: М. Высшая школа. 2006г, с.526
5. С.В. Мищенко, С.В. Пономарев, Е.С. Пономарева, Р.Н. Евлахин, Г.В.Мозгова/ История метрологии, стандартизации, сертификации и управления качеством/ Тамбов: Тамб. Гос. Техн. ун-т, 2004, с.112. ISBN 5-8265-0253-3
6. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения: М, Радио и связь, 1983г. с.320
7. Сергеев А.Г. Метрология: М: Логос, 2005г, с.275
8. Шишкин И.Ф. Основы метрологии, стандартизации и контроля качества. М.: Изд. Стандартов, 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ПРЕДИСЛОВИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В
УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

2.СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ПРОГРАММЫ
ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....

2.1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

2.1.1. Общие сведения. Основные метрологические термины и
понятия.....

2.1.2. Физические величины. Системы физических величин.
Системы единиц физических величин

Воспроизведение единиц физических величин и передача их размеров.
Эталоны и их использование.....

2.1.4. Основы теории измерений. Основной постулат метрологии.

Аксиомы теории измерений

2.2. МЕТОДЫ И ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ.

2.3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ СВОЙСТВА

2.3.1. Понятие и классификация средств измерений

2.3.2. Метрологические характеристики средств измерений.

Классы точности средств измерений

2.4. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

2.5 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТИ

2.5.1 Погрешности измерений

2.5.2. Источники погрешностей. Классификация погрешностей

2.5.3 Систематические погрешности измерений и

способы их уменьшения

2.5.4. Правила суммирования погрешностей

2.5.5 Случайные погрешности

2.6. КОНЦЕПЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

2.6.1 Оценивание и выражение неопределенности

2.6.2 Использование концепции неопределенности

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Библиографический список