

А.А. Абдувалиев, П.Г. Авакян,  
А.Б. Садыков, А.С. Умаров,  
О.Ш. Хакимов

# **ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

**КНИГА 1**

Под общей редакцией  
А.Б. Садыкова

Ташкент – 2005

УДК 53.08:389.14

**Абдувалиев А.А., Авакян П.Г., Садыков А.Б., Умаров А.С., Хакимов О.Ш.** Основы обеспечения единства измерений: В 2-х книгах/ Под. ред. А.Б. Садыкова. - Ташкент: 2005. – Кн. 1. – 230 с., ил.

В кн. 1 изложены научно-методические основы обеспечения единства измерений, рассматриваются основные вопросы теоретической и прикладной метрологии. Учтены последние решения международных организаций в области метрологии, в частности, отражены изменения, внесенные в Международную систему единиц, и рассмотрены основные положения по выражению неопределенности результатов измерений.

В кн. 2 освещено современное состояние законодательной метрологии в Узбекистане. Рассматриваются законодательные требования к объектам и субъектам метрологической деятельности. Изложены основные положения документов, составляющих законодательную и нормативно-правовую базу работ по обеспечению единства измерений. Освещены вопросы международного сотрудничества в области метрологии.

Материал книг предназначен для специалистов, повышающих квалификацию в области метрологии, а также может быть полезен студентам высших и средних специальных учебных заведений и специалистам предприятий и организаций, занимающимся вопросами метрологического обеспечения.

Книга 1-Ил. 18. Табл. 7. Прил. 5. Источников 33. Библиогр. 7.

Рецензент:  
доктор технических наук,  
профессор Р. К. Азимов

© Коллектив авторов, 2005

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Метрологическая деятельность становится сегодня неотъемлемой частью прогресса науки и техники, развития экономики и торговли. Этому в немалой степени способствует стремительное расширение Всемирной торговой организации (ВТО) для которой достоверная измерительная информация является доказательной базой взаимного доверия и признания результатов испытаний и измерений, проведенных в различных странах. В настоящее время международными метрологическими организациями с участием ВТО создается глобальная система измерений, формируется международный рынок метрологических услуг. Метрология уже давно перестала быть «тихой» кабинетной описательной наукой и является одной из движущих сил современного прогресса. Всеобщую значимость метрологической деятельности подчеркивает и решение (2000 г.) ЮНЕСКО (Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры), утвердившей день **20 мая** как *Всемирный день метрологии*.

Изложенное выше определяет необходимость соответствующей метрологической подготовки специалистов народного хозяйства. В Узбекистане, в соответствии с требованиями национальных образовательных стандартов, основы метрологии и обеспечения единства измерений включены в учебные планы всех инженерных направлений подготовки специалистов в высших и средних специальных учебных заведениях. Расширяется последипломное повышение квалификации в области стандартизации, метрологии и сертификации для работников предприятий и организаций страны. Сегодня, при подготовке специалистов и повышении их квалификации ощущается существенный дефицит литературы по указанным направлениям. В основном используется литература, изданная до 1992 г. Новых изданий явно недостаточно, кроме этого, в подавляющем большинстве изданий последних лет не отражено современное состояние метрологии и достижения мировой метрологической практики.

Следует отметить, что за последние 15 лет произошли ключевые изменения даже в такой, казалось бы, консервативной области метрологии, как теоретическая метрология: в мировую метрологическую практику внедряется принципиально новое понятие - неопределенность результатов измерений; изменилась структура и, частично, состав Международной системы единиц. Меняются акценты и в области прикладной (промышленной) метрологии - в деятельность метрологических служб Узбекистана и других государств СНГ вводится совершенно новая процедура - калибровка средств измерений; существенно повысилось внимание к таким важнейшим элементам измерительного процесса, как стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов и методики выполнения измерений. Наиболее заметные изменения претерпел другой раздел метрологии – законодательная метрология: совершенствуются и развиваются виды и формы государственного метрологического контроля и надзора; активно проводится либерализация указанной метрологической деятельности; происходит гармонизация национальных метрологических норм и правил с положениями мировой метрологической практики.

Задачей авторов настоящего издания является систематизация и доступное изложение основных положений в области обеспечения единства измерений с учетом последних изменений в этой сфере.

Книга предназначена для использования при подготовке дипломированных специалистов в области метрологии и измерительной техники, она может быть полезна также студентам других технических специальностей и направлений подготовки, преподавателям высших и средних специальных учебных заведений, специалистам, повышающим свою квалификацию в области метрологии и подтверждения соответствия, а также инженерно-техническим работникам и аспирантам.

Авторы считают приятным долгом выразить глубокую благодарность рецензенту за ценные замечания и предложения, сделанные при рецензировании настоящего издания.

Авторы будут признательны за все предложения и замечания читателей по содержанию и изложению книги, которые просят направлять по адресу: Ташкент, ул. Фарабий, 333а.

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

Измерения являются важнейшим элементом деятельности человека и сопутствуют ему на всем протяжении развития цивилизации. Потребность в измерениях возникла в незапамятные времена. Человечество, буквально с первых шагов своего развития, вынуждено было проводить разнообразные измерения и выражать их результаты в понятных всем единицах, получая, таким образом, количественную информацию о параметрах объекта измерений. Из глубины веков дошли до нас единица веса драгоценных камней - карат, единица аптекарского веса - гран. Многие меры имели антропометрическое происхождение, т. е. за единицы, например, длины, принимались отдельные части человеческого тела - длина ступни (фут), размах рук (сажень) и прочее. До сих пор восхищает логичность, и стройность системы мер древнего Вавилона, построенной на одной единице длины - локоть, меры, распространенной практически во всем древнем мире.

В настоящее время измерения являются основным процессом, используемым для получения количественной информации о свойствах природных явлений и объектах материального мира. Только путем измерений можно получить объективную информацию, характеризующую материальные и энергетические ресурсы страны, определяющую количество и качество материалов, сырья, полуфабрикатов, продукции, состояние объектов окружающей среды, качество работы транспорта, средств телекоммуникаций. Путем измерений получают информацию о параметрах, определяющих безопасность труда, продукции, промышленных объектов, здоровье людей, а также другую информацию, отражающую материальный, научный, технический потенциал общества, уровень удовлетворения потребностей его членов, достигнутый уровень общественного производства.

Парк средств измерений Узбекистана составляет в настоящее время более 6,5 млн. единиц и ежедневно в измерительных процессах участвуют несколько миллионов человек. Измерения составляют основу профессиональной

деятельности для порядка 500 тыс. человек. Это работники метрологических служб предприятий и организаций, работники служб технического контроля, сотрудники всевозможных аналитических, измерительных и испытательных лабораторий и многие другие.

На информации, полученной путем измерений, основана деятельность всех структур управления - от управления простейшими технологическими процессами до органов управления народным хозяйством государства. Правильность решений, принимаемых на всех уровнях управления на основе измерительной информации, существенно зависит от достоверности результата каждого измерения и от возможности сопоставления результатов измерений, выполненных различными средствами измерений, в различное время и в разных условиях, то есть от соблюдения в стране *единства измерений*

Под **единством измерений**, одним из ключевых понятий современной метрологической деятельности, понимают такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений находятся в установленных границах с заданной вероятностью.

Единство измерений является основой всех работ по повышению качества и конкурентоспособности продукции, услуг, технологий, решения вопросов обороны, энергоэффективности и энергосбережения и многих других проблем государства.

Обеспечение единства измерений является важнейшей государственной задачей для любой страны мира.

Научной основой работ по обеспечению единства измерений является *метрология* - наука об измерениях.

В современной метрологии, в отличие от других естественных наук, значительное число принципиальных положений установлены по взаимному соглашению. К таким положениям относятся: требования к единицам величин, к средствам и процедурам измерений, правила и нормы установления допускаемых значений характеристик средств измерений, правила обработки результатов измерений и ряд

других. Малейшее нарушение таких правил может привести к полной дезорганизации хозяйственной деятельности в стране.

В связи с этим важнейшее государственное значение приобретает законодательство в области метрологии, целью которого является защита установленного правопорядка, прав и интересов государства и отдельных лиц от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений и регулирования отношений между государственными органами управления и хозяйствующими субъектами по вопросам метрологической деятельности. Для облегчения промышленной и экономической интеграции государства в мировое сообщество и исключения технических барьеров в торговле положения национального законодательства в области метрологии должны соответствовать принятым международным и межгосударственным (региональным) правилам и нормам.

Формирование основ законодательства в области метрологии суверенного Узбекистана и создание национальной системы обеспечения единства измерений следует отнести к 1992 году. Одними из первых государственных актов в этом направлении являются Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 93 (02.03.1992) «Об организации работы по стандартизации в Республике Узбекистан» и межправительственное соглашение «О проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации», подписанное 13.03.1992 (Москва) главами правительств государств-участников Содружества Независимых Государств (СНГ).

Указанные акты определили основные направления метрологической деятельности, как в Узбекистане, так и во всем Евроазиатском регионе - СНГ.

Национальным органом Республики Узбекистан по метрологии, осуществляющем руководство и координацию работ по обеспечению единства измерений в стране, установлено Узбекское агентство стандартизации, метрологии и сертификации - **Агентство Узстандарт** (до 2002 г. - Узгосстандарт).

Научным и методическим центром работ в области метрологии определен Научно-исследовательский институт

стандартизации, метрологии и сертификации – **НИИСМС** Агентства Узстандарт (до 2002 г. - УзИИПК). В 1992 году приказом Узгосстандарта на НИИСМС возложено выполнение функций Главного центра метрологической службы и Главного центра стандартных образцов Республики Узбекистан.

28 декабря 1993 года высший орган законодательной власти Узбекистана - **Олий Мажлис**, принимает Закон Республики Узбекистан «**О метрологии**», определяющий стратегию государства в области обеспечения единства измерений и являющийся основополагающим законодательным актом в этой области.

Следующими важными этапами развития государственной политики в области метрологии являются утвержденное Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан № 410 (1994 г.) «Положение о государственном надзоре за стандартами и обеспечением единства измерений» и Постановление Кабинета Министров № 53 (1996 г.) «О формировании Национальной эталонной базы Республики Узбекистан и совершенствовании метрологического обеспечения».

Постановление № 410, наряду с Законом Узбекистана «О метрологии», развивает основные положения государственного метрологического контроля и надзора как основного механизма обеспечения в стране единства измерений, а Постановление № 53 устанавливает основные положения формирования национальной эталонной базы, являющейся техническим фундаментом единства измерений.

В 1996 году в составе Узгосстандарта создается Центр национальных эталонов Республики Узбекистан.

Дальнейшими этапами совершенствования законодательства в области метрологии являются изменения и дополнения к Закону «О метрологии», принятые Олий Мажлисом в 2000 и 2003 годах, и Постановления Кабинета Министров Республики Узбекистан № 342 (2002 г.) «О мерах по совершенствованию системы стандартизации, метрологии и сертификации продукции и услуг» и № 373 (2004 г.) «О совершенствовании структуры и организации деятельности

Узбекского агентства стандартизации, метрологии и сертификации».

.В развитие указанных законодательных актов с 1992 года в Узбекистане создается национальная нормативная база работ по обеспечению единства измерений - Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан (ГСИ Уз), включающая в себя в настоящее время порядка 500 национальных и более 2500 региональных нормативных документов в области метрологии.

Действующие на территории Узбекистана до 1992 года законодательные акты и государственные нормативные документы в области единства измерений являлись отражением существующих тогда социально-экономических отношений и жестко регламентировали все стороны метрологической деятельности предприятий и организаций. В отличие от них Закон Узбекистана «О метрологии» и документы ГСИ Уз четко ограничивают государственно - регулируемую сферу и способствуют инициативе предпринимателей и развитию в стране рыночных отношений.

Законодательство Узбекистана в области метрологии и документы ГСИ Уз постоянно развивающаяся система, соответствующая поэтапному развитию социально-экономических реформ в стране и учитывающая тенденции совершенствования международной метрологической практики.

Любой специалист, как производственной, так и непроизводственной сфер деятельности прямо или косвенно связан с измерениями и анализом их результатов. В процессе работы специалист вынужден сталкиваться с обилием измерительных задач и многообразием нормативных документов общетехнического и метрологического характера, содержащих, в том числе, и обязательные к исполнению нормы и правила.

Материал книги сформирован с целью помочь читателю сориентироваться в совокупности задач современной метрологии и обеспечить необходимый минимум подготовки в области обеспечения единства измерений.

Первые две главы книги 1 посвящены основным понятиям и положениям в области метрологии и теории измерений, в

третьей главе рассмотрены виды, характеристики средств и методик выполнения измерений. Четвертая глава посвящена вопросам воспроизведения единиц величин и передаче их размеров по цепи метрологически соподчиненных средств измерений.

В книге 2 рассмотрены основные законодательные требования к метрологической деятельности и элементам измерительных процессов, знание которых необходимо специалисту любой из сфер современной хозяйственной деятельности, и изложены вопросы международного и межгосударственного сотрудничества в области метрологии.

# ГЛАВА 1

## ОБЪЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. Метрология - наука об измерениях. Роль измерений в теории познания

Объекты и явления окружающего мира являются для нас предметами познания. Познание невозможно без получения *количественной информации* об изучаемых объектах. Такая информация обеспечивает конкретность абстрактного мышления и выход его результатов в практику.

Получить количественную информацию можно только путем измерений. Следовательно, измерения входят в процесс познания, а процедура получения измерительной информации является *познавательной процедурой*. На получении точной измерительной информации основаны успехи всех естественных наук. Д. И. Менделеев отмечал, что любая «наука начинается ... с тех пор, как начинают измерять; точная наука немислима без меры». «В природе мера и вес суть главные орудия познания».

Таким образом, *метрология* (от древнегреческого *μετρον* - мера и *λογος* – ученье, наука) - наука об измерениях, относится к *гносеологии* - теории познания (от древнегреческого *γνωσις* – знание, познание и *λογος*).

Современная метрология состоит из трех основных разделов - *теоретическая, законодательная и практическая (прикладная) метрология*.

Под указанными терминами понимают следующее:

- **теоретическая метрология** - раздел, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии;

- **законодательная метрология** - раздел, относящийся к деятельности, совершаемой национальным органом по метрологии и содержащий государственные требования, касающиеся единиц, методов измерения, средств измерений и измерительных лабораторий;

- **практическая (прикладная) метрология** - раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

## 1.2. Измеряемые величины

В повседневной деятельности постоянно возникает необходимость получать количественную оценку явлений, свойств, параметров объектов, то есть проводить измерения неких *величин*.

В широком смысле слово «величина» - понятие многовидовое.

К примеру, величина - это цена, стоимость товаров, выражаемая в денежных единицах.

С другой стороны разновидностью величин можно назвать биологическую активность лекарственных веществ, выражаемую в Международных единицах биологической активности.

Третий пример - физические величины - свойства, присущие физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам). В частности, общепринятой характеристикой пространственной протяженности тел является *длина*, а мерой другого свойства тел, инертности - *масса*. Такие величины, в основном, и являются объектом рассмотрения современной метрологии.

Обычно величины, которым можно дать количественную оценку, т.е. можно измерить называются *измеримыми величинами*.

В метрологии этому термину дается следующее определение: **величина (измеримая)** - это свойство явления, объекта, процесса, которое можно выделить качественно и определить количественно.

Величина, подлежащая измерению, называется *измеряемой величиной*.

Под этим термином понимают величину, подлежащую измерению, измеряемую или измеренную в соответствии с основной целью измерительной задачи.



### 1.3. Качественная и количественная характеристики измеряемых величин. Шкалы величин

#### 1.3.1. Система величин

Между измеряемыми величинами существуют связи, выражаемые математическими формулами, которые могут отражать законы природы, как, например закон Ома

$$I = U/R$$

или второй закон Ньютона

$$F = m \cdot a,$$

а могут быть определениями некоторых величин, например, плотности

$$\rho = m/V.$$

В подобных зависимостях одни величины выступают как *основные*, а другие - как *производные* от них. В известном смысле выбор величин в качестве основных является произвольным, но наиболее рационально следует в качестве основных выбирать величины, характеризующие фундаментальные свойства материального мира.

Опыт показывает, что всю механику, например, можно описать, используя всего три основные величины, а всю теплотехнику – с помощью четырех основных величин. Вся современная физика может быть построена на семи основных величинах.

В качестве таких величин в настоящее время установлены **длина ( $L$ )**, **масса ( $M$ )**, **время ( $T$ )**, **электрический ток ( $I$ )**, **термодинамическая температура ( $\theta$ )**, **количество вещества ( $N$ )** и **сила света ( $J$ )** (в скобках приведены символы соответствующих основных величин). С помощью этих величин образуется все многообразие производных величин и обеспечивается описание любых свойств физических объектов и явлений.

Основные и производные величины образуют *систему величин*.

### 1.3.2. Качественная характеристика величины. Размерность величины

*Качественной характеристикой величины* является *размерность величины* - выражение в форме степенного одночлена с коэффициентом пропорциональности равным единице, составленного из произведений символов основных величин в различных степенях и отражающего связь данной величины с основными величинами системы величин.

Степени символов основных величин могут быть целыми, дробными, положительными отрицательными. Понятие размерность распространяется и на основные величины. Размерность основной величины в отношении самой себя равна единице, т.е. формула размерности основной величины совпадает с ее символом.

В соответствии с международным стандартом ИСО/МЭК 31/0, размерность величины обозначается символом *dim* (от французского *dimension*). В системе величин LMTIΘNJ, соответствующей Международной системе единиц, размерность величины *X* будет:

$$dim X = L^{\alpha} \cdot M^{\beta} \cdot T^{\gamma} \cdot I^{\lambda} \cdot \Theta^{\varepsilon} \cdot N^{\eta} \cdot J^{\zeta},$$

где: *L, M, T, I, Θ, N, J* - символы величин, принятых за основные;

*α, β, γ, λ, ε, η, ζ* - показатели степени с которой основная величина входит в уравнение при определении производной величины *X* - *показатели размерности*.

При определении размерности производных величин учитывают следующие правила:

- размерности левой и правой части уравнения не могут не совпадать, так как сравнивать можно только одинаковые свойства;

- алгебра размерностей мультипликативная, т. е. состоит из одного единственного действия - умножения

- размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей,

т.е. если  $Q = A \cdot B \cdot C$ , то  $dim Q = dim A \cdot dim B \cdot dim C$ ;

- размерность частного равна отношению размерности величин,

т.е. если  $Q = A/B$ , то  $\dim Q = \dim A/\dim B$ ;

- размерность величины, возведенной в некоторую степень равна ее размерности в той же степени,

т.е. если  $Q = D^n$ , то  $\dim Q = \dim^n D$ .

Величины бывают размерными и безразмерными. Величина, в размерности которой хотя бы одна из основных величин возведена в степень не равную нулю, называется *размерной величиной*, а величина, в размерности основные величины присутствуют в степени равной нулю, называется *безразмерной величиной*.

*Пример* - сила  $F$  в системе  $LMTI\Theta NJ$  является размерной величиной –  $\dim F = L \cdot M \cdot T^{-2}$ .

Величина безразмерная в одной системе может быть размерной в другой системе.

*Например*, электрическая постоянная  $\epsilon_0$  в электростатической системе является безразмерной величиной, а в системе величин СИ, имеет размерность -  $\dim \epsilon_0 = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$ .

К условно безразмерным величинам относятся: уровень силовых и энергетических величин; кислотность (водородный показатель  $pH$ ); относительная диэлектрическая проницаемость; уровень и высота звука; относительные величины - отношения одноименных величин; плоский и телесный углы; географические широта и долгота; фаза гармонических колебаний; логарифмические величины - логарифмы отношений однородных величин; счетные (штучные) величины; количество информации, показатель преломления и другие.

К качественной определенности величины относится и *род величины*. Например, длина и диаметр детали - *однородные величины*, а длина и масса детали - *неоднородные величины*.

### **1.3.3. Количественная характеристика величины.**

#### **Размер и значения величины**

*Количественной характеристикой величины*, присущей конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу является *размер величины*. Размер величины ( $Q$ ) выражают в виде *значения величины* - некоторого числа принятых для этой величины единиц. **Значение величины** состоит из отвлеченного числа ( $n$ ), называемого **числовым значением** и **единицы величины** ( $U$ ). Таким образом, **основное уравнение измерений** можно записать в виде:  $Q = n \cdot U$ .

Для характеристики правильности полученного путем измерения значения величины в метрологии используют понятие **истинное значение** - значение величины, которое идеальным образом характеризовало бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта.

Однако истинное значение величины относится к категории абсолютной истины и не может быть получено практически, так как любое измерение сопровождается погрешностью. Поэтому на практике его заменяют *действительным значением*.

**Действительное значение величины** - полученное экспериментальным путем значение величины, настолько близкое к истинному значению, что для цели данного измерения может быть использовано вместо него.

Понятие «**действительное значение величины**» является ключевым понятием практической метрологии и связывает степень близости реально полученного при измерении значения величины к ее истинному значению - погрешность измерения, и цель самого измерения.

Действительно, каждое практическое измерение подчинено определенной цели и ошибка в измерении - погрешность, всегда приводит к определенным потерям. Так, например, большая погрешность измерения приводит к прямым потерям (и материальным и моральным), обусловленным недостоверностью полученной информации. Однако и малая погрешность измерения также приводит к потерям, обусловленным нерационально высокой стоимостью самого измерения.

Величину, разные значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены

друг на друга, называют **аддитивной величиной** (длина, масса, сила, давление и др.), а величина, для которой перечисленные действия не имеют смысла, называется **неаддитивной величиной** (термодинамическая температура).

### 1.3.4. Шкалы величин

Упорядоченная совокупность значений величины, служащая исходной основой для измерения данной величины называется **шкалой величины**. В теории измерений различают пять основных типов шкал измерений: шкала *наименований*, шкала *порядка*, шкала *разностей* (интервалов), шкала *отношений* и *абсолютная* шкала.

**Шкалы наименований** характеризуются только отношением эквивалентности различных качественных проявлений свойства. В таких шкалах отсутствуют понятия нуля и единицы измерения.

Примером шкал наименований могут являться шкалы (атласы) цветов, предназначенные для измерения цвета, для которых не имеют смысла отношения (суждения) типа «больше – меньше».

**Шкалы порядка** описывают свойства, для которых имеют смысл не только отношения эквивалентности, но и отношения порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. В таких шкалах существует или не существует нуль, но принципиально не возможно ввести единицы измерений, так как для таких шкал не установлено отношение пропорциональности, т. е. нет возможности судить во сколько раз больше или меньше конкретные проявления свойств.

*Пример – шкала твердости минералов Мооса и шкалы твердости тел (Бринелля, Виккерса, Роквелла, Шора и др.), шкалы светочувствительности, октавные, кислотное, йодное, гидроксильное, эфирное числа, баллы силы ветра (по шкале Бофорта) и силы землетрясения (по шкале Рихтера), балы аварий на атомных электростанциях (по шкале МАГАТЭ) и балы устойчивости к повреждению молью (по ГОСТ 9.055-75).*

**Шкалы разностей** (интервалов) отличаются от шкал порядка тем, что для описываемых ими свойств имеют смысл не только отношения эквивалентности, но и суммирования и пропорциональности интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойства.

В шкале интервалов размеры измеряемых величин располагаются со строго определёнными интервалами. Шкалы разностей содержат условные нули - реперы и единицы измерений, установленные по соглашению.

*Пример - Международная температурная шкала, состоящая из ряда реперных (опорных) точек, значения которых приняты по соглашению между странами Метрической Конвенции и установлены на основании точных измерений, предназначена служить исходной основой для измерений температуры. По шкале интервалов времени интервалы можно суммировать (вычитать) и сравнивать во сколько раз один интервал больше (меньше) другого, но складывать, например, даты каких-либо событий бессмысленно.*

Шкалы отношений описывают свойства, к множеству количественных проявлений которых применимы логические отношения эквивалентности, порядка и пропорциональности, а для некоторых шкал отношений ещё и отношение суммирования. В шкалах отношений существует также однозначный, естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единицы измерений, установленные по соглашению.

Наглядными примерами шкал отношений являются шкалы массы и термодинамической температуры.

**Абсолютные шкалы** обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно в них присутствует естественное однозначное определение единицы измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, ослаблению, добротности колебательной системы. Среди абсолютных шкал выделяются ограниченные по диапазону абсолютные шкалы, значения которых находятся в пределах от 0 до 1. Соответствующими величинами являются коэффициенты: полезного действия, отражения, пропускания, амплитудной модуляции и т.п.

Учитывая особенности шкал, можно сделать вывод, что с теоретической точки зрения возможны различные ситуационные соотношения между основными типами шкал измерений, единицами измерений и эталонами. Шкалы измерений могут

быть установлены и применены без единиц измерений, так как в шкалах порядка и наименований принципиально невозможно ввести единицы измерений в обычно понимаемом смысле. Поэтому в шкалах порядка и наименований эталоны могут воспроизводить и передавать шкалу и (или) размер единицы измерений. Кроме этого эталоны, воспроизводящие шкалы порядка и наименований вынужденно должны воспроизводить практически всю шкалу, а в остальных шкалах эталоны могут воспроизводить любую часть шкалы: от всего диапазона измерений до одной точки шкалы, соответствующей воспроизведению размера единицы измерений.

Интересен ещё один аспект: шкалы отношений и интервалов могут быть реализованы только через эталоны - специальные технические средства, а шкалы порядка, наименований и абсолютные шкалы, а также единицы абсолютных шкал - без эталонов. Следовательно, шкала может быть без эталона, но эталон не может быть без шкалы; могут быть шкалы без единиц измерений, но единиц без шкал измерений не бывает. Всё это свидетельствует том, что понятие **«шкалы измерений»** является более общим и фундаментальным в метрологии по сравнению с понятием **«единицы измерений»**.

Существуют виды измерений и эталоны, воспроизводящие непосредственно шкалы, и в которых отсутствует само понятие единицы измерения. К таким видам относятся, например, широко распространённые (регламентированные на международном уровне) измерения по шкалам чисел твёрдости тел, чисел светочувствительности фотоматериалов.

Широко распространены цветовые измерения в шкалах наименований с применением атласов цветов, в которых образцы цвета обозначены названиями или условными номерами. Более совершенные способы измерений цвета по трех координатным системам МКО также не содержат единиц измерений.

Существуют также международные шкалы без специальных эталонных устройств, например, шкала практической солености морской воды ШПС-78, международная шкала силы землетрясений, бальная шкала силы ветра по Бофорту.

Перевод значения величин с одной шкалы в другую осуществляется по формуле:

$$y = (x - x_1) \cdot \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

где:  $x$  и  $y$  - точки на первой и на второй шкалах;

$x_1, x_2, y_1, y_2$  - первая и вторая реперные (опорные) точки этих шкал.

## **1.4. Единицы величин. Международная система единиц**

### **1.4.1. Основные принципы построения системы единиц**

Числовые значения измеряемых величин зависят от того, какие используются единицы измерений. Поэтому роль единиц очень велика. Если допустить произвол в выборе единиц, то результаты измерений невозможно будет сопоставить между собой и это приведет к нарушению единства измерений. Поэтому единицы величин устанавливают по определенным правилам и закрепляют законодательным путем, т. е. вводят в обращение так называемые «*узаконенные единицы*».

**Единицей величины** (единицей измерения величины, единицей измерения, единицей) называют величину фиксированного размера, которой *условно* присвоено числовое значение равное единице и применяемую для количественного выражения однородных с ней величин (например, метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, ньютон и др.).

Единицы величин, как и сами величины, делятся на *основные* и *производные* единицы. Совокупность основных и производных единиц величин, образованная в соответствии с принципами, принятыми для заданной системы величин, называют *системой единиц величин* (системой единиц).

Если размеры основных единиц системы выбираются произвольно и определяются исключительно соображениями удобства их использования на практике, то размеры производных единиц устанавливаются на основании размеров основных единиц и уравнений, описывающих связь каждой

конкретной *производной* величины с основными величинами. Такие уравнения называют *определяющими*. Если в системе единиц коэффициенты пропорциональности в уравнениях, определяющих производные единицы, равны 1 (единице), то такая система единиц величин называется *когерентной* или *согласованной*. Согласованные системы единиц величин являются наиболее простыми и удобными в обращении.

Погрешность воспроизведения с помощью эталонов производных единиц системы в значительной степени зависит от погрешности воспроизведения основных единиц. Поэтому в качестве основных выбирают единицы величин, воспроизведение которых, на данном уровне развития науки и техники, возможно с наивысшей точностью.

Количество основных единиц в согласованной системе должно быть минимальным, но, в то же время, достаточным для образования всего комплекса производных единиц, необходимых для практического использования. Данное правило обусловлено тем, что с увеличением числа основных величин увеличивается число уравнений, описывающих связь конкретной производной величины с основными величинами. Если при установлении размера единицы этой производной величины (размера производной единицы) одно из таких уравнений выбрать в качестве определяющего и принять в нем коэффициент пропорциональности равный единице, то в других уравнениях неизбежно появятся коэффициенты отличные от единицы. Такие коэффициенты носят название «*физические постоянные (константы)*». Для обеспечения единства измерений значения физических постоянных определяют с наивысшей возможной точностью, что всегда связано с значительными материальными затратами.

#### **1.4.2. Международная система единиц**

Некоторая условность в выборе величин в качестве основных и условность выбора размера единиц привела к образованию значительного числа различных систем единиц, что к середине XX века стало существенным тормозом научно-технического прогресса. Поэтому в 1960 г. на XI Генеральной

конференцией по мерам и весам (ГКМВ) была утверждена и рекомендована ко всеобщему применению *Международная система единиц*, получившая в странах СНГ обозначение **СИ** (от французского обозначения *SI* - *Système International*).

Международная система единиц является развитием Метрической системы мер – первой системы единиц, принятой на международном уровне при подписании 20 мая 1875 года Международной метрической конвенции.

В настоящее время СИ является официальной системой единиц в более чем ста странах мира и составляет основу международной деятельности по глобальному обеспечению единства измерений.

В Республике Узбекистан СИ законодательно утверждена как единственная система единиц, допущенных к применению во всех, без исключения, отраслях деятельности.

Международная система единиц базируется на семи основных единицах, наименования, международные обозначения и определения которых приведены в таблице 1.1.

*Таблица 1.1.*

Основные единицы Международной системы единиц

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	определение
Длина	метр	m	Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299792458$ s [XVII ГКМВ (1983 г.), Резолюция 1]
Масса	килограмм	kg	Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1889 г.) и III ГКМВ (1901 г.)]
Время	секунда	s	Секунда есть время, равное $9192631770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния

			атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция 1]
--	--	--	----------------------------------------------------

Окончание таблицы 1.1.

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	Определение
Электрический ток (сила электрического тока)	ампер	А	Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным, прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ N [МКМВ (1946 г.) Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948 г.)]
Термодинамическая температура	кельвин	К	Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды [XIII ГКМВ (1967 г.) Резолюция 4]
Количество вещества	моль	mol	Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 kg. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц [XIV ГКМВ (1971 г.), Резолюция 3]
Сила света	кандела	cd	Кандела есть сила света в заданном

			направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Hz, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ W/sr [XVI ГКМВ (1979 г.) Резолюция 3]
--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

До 1995 г. в структуру СИ входил класс так называемых *дополнительных единиц*. Это единица плоского угла – радиан (rad) и единица телесного угла - стерадиан (sr). Решением XX ГКМВ (1995 г.) единицы плоского и телесного угла принято считать безразмерными производными единицами, а класс дополнительных единиц исключен.

Указанные семь основных единиц СИ позволяют образовать десятки производных единиц для всех областей современных знаний. Двадцать две производные единицы СИ имеют собственные наименования. Эти единицы, приведенные в таблице А.1 приложения А, также могут быть использованы для образования других производных единиц СИ.

СИ - когерентная система единиц.

В настоящее время международная система единиц является наиболее удобной и универсальной системой, признанной во всем мире, однако практические соображения заставляют применять в ряде случаев и единицы, не входящие в систему. Такие единицы, например, единица длины - световой год, единица массы - карат, называются *внесистемными единицами*.

Внесистемные единицы, допущенные к применению наравне с единицами СИ, приведены в таблице А.2. приложения А.

К внесистемным единицам относятся также и относительные и логарифмические единицы, некоторые из которых, допускаемые к применению без ограничений, приведены в таблице А.3 приложения А.

На практике также часто возникают случаи, когда удобнее использовать единицы в определенное число раз больше или меньше исходной единицы системы. Например, в геодезии удобнее использовать единицу длины *километр (km)*, размер которой в 1000 раз больше размера исходной единицы длины СИ, имеющей, как известно, наименование - метр, а обозначение - м. В часовой промышленности удобнее использовать единицу длины *миллиметр (mm)*, размер которой в 1000 меньше. Такие единицы называются *кратными* и *дольными*.

Наименования и обозначения кратных и дольных единиц образуют путем прибавления соответствующих приставок (в

нашем примере – «кило» и «милли») или обозначений (в примере – «*k*» и «*m*») к наименованию или обозначению исходной единицы системы единиц.

Образование кратных и дольных единиц от единиц СИ допускается только по принципу десятичной кратности, т. е. умножением размера исходной единицы СИ на  $10^n$  ( $n$  - целое положительное или отрицательное число). В настоящее время диапазон приставок для получения кратных и дольных единиц расширен от  $10^{-24}$  [наименование приставки - иокто, обозначение - у] до  $10^{24}$  [иота, (Y)] (Решение XX ГКМВ, 1995 г.).

Множители и приставки, используемые для образования наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ, приведены в таблице А.4 приложения А.

Образование широко распространенных единиц времени - минута (min), час (h), не подчиняется принципу десятичной кратности. По этой причине указанные единицы времени являются внесистемными единицами.

Единицы системы СИ и внесистемные единицы, допускаемые к применению в Узбекистане, правила образования кратных и дольных единиц, наименования и обозначения единиц и правила их применения установлены в государственном стандарте Узбекистана O‘z DSt 8.012:2005.

Стандартом допускается применение ограниченного числа внесистемных единиц и в строго обозначенных областях деятельности. Например, единица массы карат может использоваться только при добыче и производстве драгоценных камней и жемчуга, а единица энергии киловатт-час - только для счетчиков электрической энергии. Внесистемные единицы времени (минута, час, сутки, год) допускаются к применению без ограничений. Также без ограничений допускается к применению, наряду с единицей температуры СИ - кельвин (обозначение - К), внесистемная единица температуры - градус Цельсия (обозначение - °C), при этом  $273,15 \text{ K} = 0 \text{ °C}$ . Без ограничений допускается выражать значения плоского угла в угловых градусах (единица плоского угла в СИ - радиан).

С другой стороны в стандарте отсутствует ряд традиционных внесистемных единиц, например, единица

мощности - лошадиная сила. Следовательно, применение таких внесистемных единиц **недопустимо**.

Все величины в международной системе единиц имеют одну единственную единицу (основную или производную), за исключением концентрации - величины, характеризующей относительное содержание данного компонента в многокомпонентной системе (смеси, растворе, сплаве и другие), имеющую целый ряд единиц, и все они являются производными единицами СИ, а именно:

- mol/m<sup>3</sup> - единица молярной концентрации (отношение количества данного компонента в молях к объему системы);

- mol/kg - единица молярности (отношения числа молей данного компонента к массе системы);

- kg/m<sup>3</sup> - единица массовой концентрации (отношения массы данного компонента к объему системы);

- 1, % (процент - сотая часть), ‰ (промилле - тысячная часть), ppm (миллионная часть), ppb (миллиардная часть) - единицы массовой доли (отношения массы данного компонента к массе системы), молярной доли (отношения количества вещества данного компонента к количеству вещества системы), объемной доли (отношение объема данного компонента к объему системы) данного компонента в многокомпонентной системе.

В соответствии с изложенным не допускаются к применению часто встречающиеся на практике единицы :

- объёмной доли компонента смеси – ml/l, µl/l;

- массовой доли компонента смеси - mg/kg, µg/kg, g/t, mg/t.

Не допускаются также к применению слова «концентрация, состав, содержание, количество» вместо терминов «массовая концентрация, молярная концентрация, молярность, а также массовая, молярная и объемная доли данного компонента в многокомпонентной системе».

Стандарт O‘z DSt 8.012:2005, в отличие от действовавших ранее в Узбекистане требований, устанавливает во всех видах публикаций, включая нормативные документы, научно-технические и иные публикации, в том числе публикации средств массовой информации, учебную, учебно-методическую и справочную литературу, только один вид обозначений

единиц – международные обозначения. При этом допускается в научно-технической литературе на русском языке применять русские обозначения единиц по ГОСТ 8.417:2002. Не допускается применение разных видов обозначений единиц в одном тексте.

Обозначения единиц применяют только с числовым значением и не разделяют их при переносе. Между числовым значением и обозначением единицы должен быть интервал на один знак.

*Например – 10 m/s, 15 %, 20 °C, но 35° 16' 48".*

Обозначения единиц, наименования которых даны в честь ученых, записывают с прописной (заглавной) буквы.

*Например – Pa – обозначение единицы давления (паскаль).*

С обозначениями единиц, точка, как знак сокращения, не применяется.

Единицы метрической системы стали выборочно применяться на территории Центральной Азии в конце XIX века и окончательно официально были узаконены в двадцатых годах XX века, вытеснив все ранее применявшиеся единицы.

Некоторые, из традиционно применявшихся народами Центральной и Средней Азии, единицы величин приведены в качестве исторической справки в приложении Е.

## **1.5. Метрологическая терминология**

Учитывая важность метрологии для развития всех направлений деятельности человечества, международное и межотраслевое значение метрологических норм и правил, существенным фактором взаимопонимания и согласованности действий является единство метрологической терминологии и необходимость четкого соблюдения принятых понятий. Поэтому документы в области метрологической терминологии разрабатываются и применяются на международном, региональном и на национальном уровнях. При этом, для обеспечения единства метрологической терминологии в условиях интенсивной глобализации экономики, региональные и национальные терминологические документы формируются с

максимально возможным приближением к положениям международных документов.

К разработке международной терминологии в области метрологии привлекаются ведущие международные организации сферы интересов, которых, в той или иной степени, связана с метрологией. Этими авторитетными международными организациями являются:

- Международное бюро мер и весов - МБМВ (BIPM);
- Международная электротехническая комиссия - МЭК (IEC);
- Международная организация законодательной метрологии - МОЗМ (OIML);
- Международная организация по стандартизации - ИСО (ISO);
- Международный союз чистой и прикладной химии - ИЮПАК (IUPAC);
- Международный союз чистой и прикладной физики - ИЮПАП (IUPAP);
- Международная федерация клинической химии - МФКХ (IFCC).

В настоящее время в области метрологии существуют следующие международные терминологические документы:

«**Международный словарь общих и основных терминов в области метрологии**» (VIM) (1993), разработанный семью ведущими международными организациями – МБМВ, МОЗМ, ИСО, МЭК, ИЮПАК, ИЮПАП и МФКХ;

«**Международный словарь терминов законодательной метрологии**»(VIML) (2000), разработанный МОЗМ.

В Узбекистане метрологические термины и их определения установлены межгосударственным рекомендательным документом РМГ 29-99 и государственными стандартами Узбекистана серии O‘z DSt 8.010 - O‘z DSt 8.010.1:2002, O‘z DSt 8.010.2:2003, O‘z DSt 8.010.3:2004, O‘z DSt 8.010.4:2002.

## ГЛАВА 2

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Виды и методы измерений

#### 2.1.1. Измерения. Виды измерений

Широкое распространение в отечественной и зарубежной литературе получило следующее определение понятия *«измерение»*: - **измерение - нахождение значения величины опытным путем с помощью специальных технических средств.**

В межгосударственном терминологическом документе РМГ 29-99 дано более уточненное определение этого 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.

Анализируя приведенные определения следует отметить, что метрология оперирует понятием «измерение» исключительно как экспериментальной процедурой, использующей особые технические средства (средства измерений). Никакие теоретические рассуждения или расчеты сами по себе не могут быть классифицированы как измерения. Результатом измерения является оценка величины в виде некоторого числа единиц этой величины.

Таким образом, в процессе измерения получают значение величины (количественную оценку) в виде определенного числа единиц (числового значения), принятых для этой величины.

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

Применяемые на практике измерения можно классифицировать по различным признакам: по характеру зависимости измеряемой величины от времени, по способу получения числового значения, по условиям, определяющим точность результата измерения, и ряду других.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения подразделяют на *статические* и *динамические*.

**Статическими** называют измерения величин, принимаемых в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменные за время измерения. Например, измерение длины детали при комнатной температуре.

**Динамическими** называют измерения величин, размеры которых изменяются в процессе измерения. Например, измерения вибраций.

Строго говоря, любая величина подвержена тем или иным изменениям во времени, поэтому деление измерений на статические и динамические является условным.

По способу получения числового значения измеряемой величины все измерения делят на следующие виды: *прямые*, *косвенные*, *совместные*, *совокупные*.

**Прямое измерение**- измерение, при котором значение искомой величины находят непосредственно из опытных данных.

Простейшими примерами прямых измерений являются, измерение длины линейкой, массы на циферблатных или равноплечих весах, электрического тока амперметром, температуры термометром.

Следует отметить, что при прямых измерениях, как правило, не производится вычислений значения искомой величины и измерению подвергается сама искомая величина в том или ином ее проявлении в отличие, например, от косвенных измерений. Прямые измерения являются основой всех остальных видов измерений.

**Косвенное измерение** - измерение, при котором искомое значение величины находят на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной.

Таким образом, особенностью косвенных измерений является то, что измерениям подвергается не собственно искомая величина, а другие величины, функционально с ней связанные. Искомое значение величины находят путем вычислений.

Наглядным примером косвенных измерений является нахождение расчетным путем значения электрического сопротивления участка цепи постоянного тока ( $R$ ) по результатам прямых измерений падения электрического напряжения на этом участке ( $U$ ) вольтметром и электрического тока в цепи ( $I$ ) амперметром с учетом известного закона Ома, связывающего эти величины:

$$R = U/I.$$

Применимость прямых или косвенных измерений зависит от измеряемой величины и требуемого уровня точности. Например, гораздо проще применить прямое измерение электрического сопротивления омметром. Однако, в ряде случаев прямые измерения вообще нельзя практически осуществить. Например, объем сосуда сложной формы можно определить только косвенно путем измерений массы жидкости, вмещаемой сосудом, и плотности этой жидкости.

**Совместные измерения** - проводимые одновременно (прямые или косвенные) измерения двух или нескольких *не одноименных* величин для нахождения зависимости между ними.

Результаты совместных измерений находят путем решения системы уравнений.

В качестве примера совместных измерений можно привести нахождение электрического сопротивления измерительного резистора, соответствующего температуре плюс 20 °С ( $R_{20}$ ), и температурного коэффициента сопротивления ( $\alpha$ ) по результатам измерений сопротивления резистора ( $R_{t1}$  и  $R_{t2}$ ) при разных температурах ( $t_1$  и  $t_2$ ) вблизи температуры плюс 20 °С и решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_1 - 20)] \\ R_{t_2} = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_2 - 20)] \end{cases}$$

**Совокупные измерения** - проводимые одновременно измерения нескольких *одноименных* величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

Например, нахождение значений массы отдельных гирь набора по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь.

Следует отметить, что для определения значений искомых величин при совместных или совокупных измерениях число уравнений должно быть не менее числа величин.

### 2.1.2. Методы прямых измерений

На практике измерения проводятся различными методами, позволяющими исключить из результатов измерений отдельные составляющие погрешности и тем самым освободить оператора от необходимости определения многочисленных поправок с целью повышения достоверности результатов измерений. При этом под *методом* измерения понимается прием или совокупность приемов использования средств измерений в соответствии с реализованным *принципом* измерений, т. е. физическим явлением или эффектом, положенным в основу измерений.

Как уже указывалось, прямые измерения являются основой всех других видов измерений, в связи с этим следует особо рассмотреть методы прямых измерений: *метод непосредственной оценки* и *метод сравнения*.

Наиболее простым, широко распространенным и не требующем высокой квалификации оператора является **метод непосредственной оценки** при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений (измерительному прибору прямого действия).

В качестве примера можно привести измерения давления манометром, электрического тока амперметром, длины микрометром.

Метод непосредственной оценки, однако, не обеспечивает высокую точность измерения.

Более сложным, но и более точным, является **метод сравнения** при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Сравнение измеряемой и известной величин может проводиться различными способами.

В связи с этим метод сравнения имеет несколько разновидностей.

**Дифференциальный метод** - метод сравнения с мерой, в процессе которого на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой и известной величинами.

Обычно метод применяют при незначительной разности между сравниваемыми величинами. Следует отметить, что при уменьшении разности между этими величинами точность измерения возрастает.

Примером являются измерения, выполняемые при поверке мер длины сравнением с эталонной мерой на компараторе.

**Нулевой метод** - метод сравнения с мерой, при котором результирующий эффект воздействия измеряемой и известной величин на прибор сравнения доводят до нуля.

Нулевой метод является предельным случаем дифференциального. При этом погрешность самого прибора сравнения не влияет на погрешность измерения. Этот прибор должен иметь как можно более высокую чувствительность для четкой фиксации самого факта равенства между сравниваемыми величинами. Такие приборы сравнения часто называют *нуль-индикаторами*.

Примером нулевого метода является измерение электрического сопротивления мостом при полном его уравнивании.

**Метод замещения** - метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают величиной, воспроизводимой мерой, находящейся в тех же условиях.

Например, точное взвешивание с поочередным помещением измеряемого объекта и гирь известной массы на одну и ту же чашку весов (метод Борда).

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

Например, измерения длины с помощью штангенциркуля, имеющего, как известно, дополнительную, так называемую, нониусную шкалу, основано на наблюдении совпадения отметок шкал – основной шкалы штангенциркуля и шкалы нониуса.

Другим примером метода является измерение частоты вращения детали с помощью мигающей лампы стробоскопа.

## 2.2. Основной постулат метрологии

Любое измерение предполагает сравнение неизвестного размера с известным. В итоге этого сравнения получают значение неизвестного размера в виде его соотношения с известным размером, в качестве которого выбирают единицу величины.

Сам процесс сравнения размеров (измерительная процедура) происходит под влиянием множества случайных и неслучайных факторов, точный учет которых невозможен, а результат их совместного воздействия непредсказуем. В связи с этим при повторении измерительной процедуры все время получают несколько различные результаты.

Таким образом, **результат** измерительной процедуры является **случайным числом**. Это утверждение, основанное на всем, накопленном к настоящему времени, опыте практических измерений, называют **основным постулатом метрологии**.

## 2.3. Погрешности измерений

### 2.3.1. Классификация погрешностей. Основные понятия

Погрешность измерения является важнейшей характеристикой измерения и представляет собой количественную оценку степени приближения результата измерения к истинному значению величины. Поскольку, как это было отмечено выше, истинное значение величины является недостижимым, на практике при оценке погрешности вместо него используют действительное значение величины.

По форме числового выражения погрешности измерений принято делить на *абсолютные* и *относительные*.

**Абсолютной погрешностью** ( $\Delta x$ ) называется разность между результатом измерения ( $x$ ) и действительным значением измеряемой величины ( $X_0$ ). Таким образом -  $\Delta x = x - X_0$ .

Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины, что не всегда удобно для наглядной оценки измерительного процесса. Поэтому часто пользуются выражением погрешности в относительных единицах.

**Относительная погрешность** ( $\delta x$ ) определяется как отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины. Таким образом:  $\delta x = \Delta x / X_0$ .

Относительная погрешность может выражаться просто в относительных единицах (неименованным числом), в процентах (%), в промилле (‰), в частях на миллион (ppm), в частях на миллиард (ppb).

Выбор той или иной формы выражения относительной погрешности зависит от значения погрешности и традиций, принятых в конкретной области измерений или конкретной стране. Например, можно записать:

$\delta x = 5 \cdot 10^{-7}$ , или 0,00005 %, или 0,0005 ‰, или 0,5 ppm, или 500 ppb.

Чаще всего относительную погрешность выражают в процентах, тогда:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{X_0} \cdot 100.$$

Погрешности измерений вызываются различными причинами. Одни из этих причин действуют постоянно и закономерно, другие имеют различное влияние при каждом измерении. Соответственно и погрешности измерений будут различными в зависимости от характера вызвавших их причин. Поэтому погрешность измерения, в соответствии с основным постулатом метрологии, всегда является случайной величиной, которую можно представить как

сумму детерминированной и случайной величин.

Первую из этих составляющих называют **систематической погрешностью измерения** и определяют как составляющую погрешности измерения, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины.

Вторая составляющая - **случайная погрешность измерения** - составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины, проведенных с одинаковой тщательностью.

В ряду погрешностей измерений различают также **грубые погрешности** или **промахи**, относящиеся к категории случайных величин.

Грубые погрешности могут возникнуть из-за ошибок или неправильных действий оператора, а также вследствие кратковременных, резких изменений условий проведения измерений. Обычно результаты измерений, содержащие грубые погрешности, обнаруживают и исключают из дальнейшего рассмотрения основываясь на статистических критериях аномальности измерений.

Для *качественной оценки* результатов измерений часто используют такие понятия как, *правильность*, *сходимость*, *воспроизводимость*, *точность* измерений.

При этом под понятием «**правильность измерения**» (правильность результатов измерения) понимают качество измерения, отражающее близость к нулю систематической составляющей погрешности измерений.

Понятие «**сходимость результатов измерений**» (сходимость измерений) характеризует близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях, т.е. близость к нулю случайной составляющей погрешности данной серии измерений.

**Точность измерений** (точность результатов измерений) - характеристика качества измерений, отражающая близость к нулю как систематической, так и случайной составляющих погрешности измерений.

Под понятием «**воспроизводимость измерений**» понимают качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполненных в различных условиях (в различное время, в различных местах, различными методами и средствами).

Случайная погрешность может рассматриваться как случайная величина с математическим ожиданием равным нулю. Другими словами, среднее арифметическое бесконечного числа повторных измерений одной и той же величины (такие повторные измерения называют *наблюдениями*) не будет содержать случайной погрешности.

Для конечного числа наблюдений возможные границы случайной погрешности могут быть определены путем специальной математической обработки результатов этих наблюдений и окончательный результат может быть уточнен с некоторой вероятностью, естественно, не равной 100 %. Но, так как в каждом из результатов наблюдений присутствует некая систематическая составляющая (систематическая погрешность), то и окончательный результат будет искажен этой погрешностью.

**Как наличие случайной погрешности невозможно выявить по результату однократного наблюдения**, так и систематическую погрешность невозможно определить математической обработкой результатов многократных наблюдений.

**Систематическая погрешность может быть определена и, соответственно, исключена только опытным путем.** Многообразие причин, вызывающих систематические погрешности, определяет и многообразие приемов их обнаружения и исключения.

### **2.3.2. Виды систематических погрешностей**

В зависимости от характера изменения систематические погрешности подразделяют на:

- *постоянные погрешности* – погрешности, длительное время сохраняющие свое значение, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений);

- *прогрессивные погрешности* - непрерывно монотонно возрастающие или убывающие погрешности;

- *периодические погрешности* - погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора;

- *погрешности, изменяющиеся по сложному закону* – погрешности, которые происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

К постоянным погрешностям можно отнести, например, систематические погрешности гирь, погрешности градуировки показывающих приборов.

К прогрессивным погрешностям относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

Периодическая погрешность присуща, например, измерительным приборам с круговой шкалой (индикатор часового типа, применяемый для измерений малых линейных перемещений) и обусловлена несовпадением оси шкалы и оси вращения указателя.

По причинам возникновения различают *инструментальные*, *методические* и *субъективные* составляющие систематической погрешности измерений.

**Инструментальные составляющие систематической погрешности (инструментальная погрешность)** обусловлены неидеальностью свойств применяемых средств измерений. Они могут быть вызваны несовершенством конструкции средств измерений, недостатками технологии изготовления, градуировки, износом и старением отдельных элементов, влиянием внешних факторов на параметры средств измерений, неправильной установкой средства измерений и другими факторами.

**Методические составляющие систематической погрешности (методическая погрешность)** возникают вследствие несовершенства метода измерений и теоретических допущений, принимаемых при описании метода измерений.

Существенным источником методической погрешности является неадекватность модели объекта измерений реальным свойствам объекта.

**Субъективная погрешность** связана с индивидуальными особенностями наблюдателя, навыками работы, рядом физиологических факторов, например, скоростью его реакции, особенностями цветовосприятия, остротой зрения, слуха и другими.

Субъективная погрешность может быть вызвана также воздействием оператора на объект и средства измерений (искажение температурного поля, механические воздействия и пр.).

Обычно субъективная погрешность помимо систематической составляющей содержит и случайную составляющую, которая тем больше, чем ниже квалификация наблюдателя.

## 2.4. Законы распределения вероятностей и их числовые характеристики

### 2.4.1. Функции распределения вероятностей случайных величин

Методы теории вероятностей и математической статистики позволяют установить вероятностные (статистические) закономерности появления случайных величин и на основании этих закономерностей дать количественные оценки результата измерений и его случайной погрешности.

Для характеристики свойств случайных чисел (величин) в теории вероятностей используют понятие *закона распределения вероятностей* случайной величины.

Закон распределения вероятностей дает полную информацию о свойствах случайной величины и позволяет получить вероятностное значение измеряемой величины и характеристики случайной погрешности.

Основными характеристиками законов распределения вероятностей случайных чисел (величин) являются *интегральная* и *дифференциальная* функции распределения и числовые характеристики положения, рассеяния, асимметрии и эксцесса распределений вероятностей.

**Интегральная функция распределения** случайной величины  $F_x(x)$  представляет собой зависимость вероятности того, что результат наблюдения  $x_i$  в  $i$ -ом опыте окажется меньшим некоторого текущего значения  $x$ , от самой величины  $x$ :

$$F_x(x) = P\{x_i \leq x\} = P(-\infty < x_i \leq x),$$

где:  $P$  - символ вероятности события, описание которого заключено в фигурные скобки.

**Дифференциальная функция распределения**, иначе называемая плотностью распределения вероятности  $p(x)$  является функцией, производной от интегральной функции распределения:

$$p(x) = dF_x(x)/dx.$$

Таким образом интегральная и дифференциальная функции распределений связаны между собой следующим выражением:

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot dx .$$

Формирование дифференциальной функции распределения можно рассмотреть на примере измерений с многократными наблюдениями. Пусть проведено  $n$  последовательных наблюдений одной и той же величины  $X$  и получена группа результатов этих наблюдений  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Все эти результаты представляют собой случайные числа, т. к. каждый из них содержит ту или иную случайную погрешность. Первоначально располагают результаты наблюдений в порядке их возрастания от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$  и находят размах полученного ряда  $L = x_{\max} - x_{\min}$ . Разделив размах ряда на  $k$  равных интервалов  $\Delta l = L / k$ , подсчитывают количество наблюдений  $n_k$ , попадающих в каждый интервал. Полученные результаты изображают графически, нанося на оси абсцисс значения величины и обозначив границы интервалов, а по оси ординат – относительную частоту попаданий результатов наблюдений в каждый из интервалов –  $n_k / n$ . Построив на диаграмме прямоугольники, основанием которых является ширина интервалов, а высотой частота  $n_k/n$ , получают так называемую гистограмму, фигуру, дающую наглядное представление о плотности распределения результатов наблюдений в данном опыте.

На рис. 2.1 показана гистограмма, полученная в одном из опытов и построенная на основании результатов 50 наблюдений, сгруппированных в таблице 2.1.

В приведенном примере в первый и последующие интервалы попадает соответственно 0,1; 0,2; 0,36; 0,22 и 0,12 от общего количества наблюдений. При этом, из самого принципа определения относительной частоты попадания результатов наблюдений в каждый интервал, с очевидностью следует, что сумма всех этих чисел равна единице.

Если распределение значений случайной величины  $x$  статистически устойчиво, то можно ожидать, что при повторных сериях наблюдений той же величины и в тех же условиях, относительные частоты попаданий в каждый интервал будут близки к первоначальным. Это означает, что построив один раз гистограмму, при последующих сериях наблюдений можно, с определенной долей уверенности, заранее предсказать распределение результатов наблюдений по интервалам.

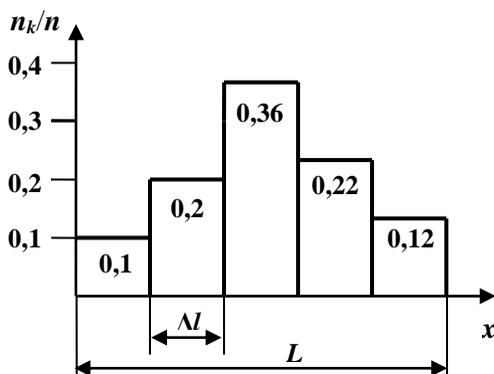


Рис. 2.1. Гистограмма

Таблица 2.1.

Исходные данные для построения гистограммы

Номер интервала	1	2	3	4	5
$n_k$	5	10	18	11	6
$n_k/n$	0,1	0,2	0,36	0,22	0,12

Приняв общую площадь, ограниченную контуром гистограммы и осью абсцисс за единицу ( $S_0 = 1$ ), относительную частоту попаданий ( $n_k/n$ ) результатов наблюдений в тот или иной интервал можно определить как отношение площади соответствующего прямоугольника шириной  $\Delta l$  к общей площади.

При бесконечном увеличении числа наблюдений  $n \rightarrow \infty$  и бесконечном уменьшении ширины интервала  $\Delta l \rightarrow 0$ ,

ступенчатая кривая, огибающая гистограмму, перейдет в плавную кривую  $p(x)$  (рис. 2.2), называемую *кривой плотности распределения вероятности случайной величины*, а уравнение, описывающее ее – *дифференциальным законом распределения*.

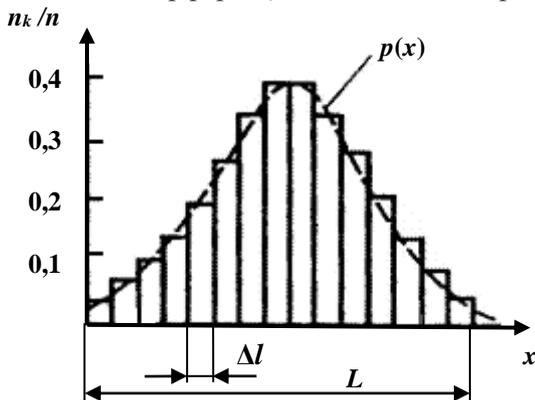


Рис. 2.2. Кривая плотности распределения вероятностей

Кривая плотности распределения вероятностей всегда неотрицательна и площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс, равна единице.

Интегральная функция распределения на минус  $\infty$  равна нулю, на плюс  $\infty$  равна единице, т.е.

$$F(-\infty) = 0, \quad F(+\infty) = 1.$$

Следовательно

$$P\{-\infty < x \leq +\infty\} = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot dx = 1.$$

Вероятность попадания результата наблюдений или случайной погрешности в заданный интервал  $[x_1; x_2]$  равна разности значений интегральной функции распределения на границах этого интервала

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

Графически эта вероятность выражается отношением площади, лежащей под кривой  $p(x)$  в интервале от  $x_1$  до  $x_2$ , к общей площади, ограниченной кривой распределения.

Кроме непрерывных случайных величин в метрологической практике встречаются и дискретные случайные величины. Пример распределения дискретной случайной величины приведен на рис. 2.3.

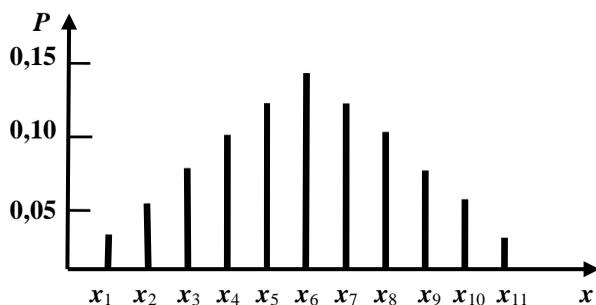


Рис. 2.3. Распределение дискретной случайной величины

#### 2.4.2 Числовые характеристики распределения вероятностей

Описание результата измерения, как случайной величины, с помощью функций распределения вероятностей является наиболее полным, но неудобным. В метрологической практике обычно ограничиваются приближенным описанием распределения вероятностей с помощью его числовых характеристик или *моментов*. Все они представляют собой некоторые средние значения, причем, если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, моменты называются *начальными*, а если от центра закона распределения, то – *центральными*.

**Начальные** числовые характеристики распределений вероятностей (моменты) определяют *положение* дифференциальной функции распределения вероятностей, а **центральные** (характеристики рассеяния вероятностей, характеристики асимметрии и эксцесса), ее *форму*.

К характеристикам положения распределений вероятностей относятся: *центр распределения (математическое ожидание), медиана, мода*.

**Математическое ожидание дискретной случайной величины  $x$ :**

$$M[x] = x_1 \cdot P_1 + x_2 \cdot P_2 + \dots + x_n \cdot P_n = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_i$$

**Математическое ожидание непрерывной случайной величины  $x$**

$$M[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x) \cdot dx$$

Математическое ожидание неслучайного числа равно самому этому числу:

$$M[a] = a.$$

Постоянный множитель можно выносить за знак математического ожидания:

$$M[a \cdot x] = a \cdot M[x].$$

Математическое ожидание суммы случайных чисел равно алгебраической сумме их математических ожиданий:

$$M[x + y + z] = M[x] + M[y] + M[z].$$

Математическое ожидание произведения независимых случайных чисел равно произведению их математических ожиданий:

$$M[x \cdot y \cdot z] = M[x] \cdot M[y] \cdot M[z].$$

Математическое ожидание отклонения случайного числа от его математического ожидания равно нулю:

$$M [x - M [x]] = 0.$$

Меры центра распределения - это числа (число), которые характеризуют положение центра. Из них наиболее часто применяются следующие три, это: *среднее арифметическое* (или просто среднее), *мода* и *медиана*.

**Среднее арифметическое дискретных случайных чисел** (величин) ( $\bar{x}$ ) - это сумма всех данных, делённая на их количество. Таким образом:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.4.1)$$

где:  $x_i$  - представляет каждое значение;

$n$  - объём выборки (или число измерений).

Например, получены девять чисел: 5, 3, 7, 9, 8, 5, 4, 5, 8. Для них среднее арифметическое равно 6.

Среднее арифметическое обозначают также как и саму величину, только с той разницей, что над буквенным обозначением величины ставят черточку, например,  $\bar{x}$ .

Среднее арифметическое наиболее широко используемая мера центра распределения.

Достоинства использования среднего арифметического:

- это «центр тяжести» всех данных;
- в нём используются все данные;
- не нужна сортировка.

Недостатки использования среднего арифметического:

- резко выделяющиеся значения могут испортить картину;
- может потребоваться много времени для расчёта;
- среднее может и не совпадать ни с одним из фактических значений.

**Мода непрерывного распределения** есть точка максимума плотности распределения вероятностей.

**Мода дискретных случайных чисел** (величин) - это то значение, которое встречается во множестве данных наиболее часто.

Например, из девяти чисел: 5, 3, 7, 9, 8, 5, 4, 5, 8 модой будет 5.

*Примечание: Для групп данных может существовать более чем одна мода.*

Достоинства использования моды:

- не надо ни вычислять, ни сортировать;
- резко выделяющиеся значения не влияют на результат;
- это одно из фактических значений;
- его можно отыскать визуально на графике распределения.

К недостаткам использования моды следует отнести тот фактор, что некоторые опытные данные могут и не иметь моды.

**Медиана** (средняя точка) **дискретных случайных чисел** (величин) - это срединное значение данных, упорядоченных по возрастанию или убыванию. Для чётного числа данных медиана - среднее из двух ближайших к центру значений.

Например, из десяти чисел - 2, 2, 2, 3, 4, 6, 7, 7, 8, 9 - медианой будет 5.

Достоинства использования медианы:

- позволяет представить, где расположена большая часть данных;
- требуется совсем мало вычислений.

Недостатки использования медианы:

- данные надо сортировать и упорядочивать;
- используются не все данные;
- резко выделяющиеся данные могут быть существенными.

К числовым характеристикам рассеяния вероятностей в основном относятся: *дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, среднее абсолютное отклонение, размах.*

**Дисперсия**  $D[x]$  или  $D(x)$  или  $D_x$  или  $\sigma_x^2$  случайной величины – математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания, т.е.

$$D [x] = D (x) = D_x = \sigma_x^2 = M [(x - M [x])^2].$$

Дисперсия дискретного случайного числа:

$$D[x] = \sum^n (x_i - m_x)^2 \cdot P_i \cdot$$

Дисперсия непрерывной случайной величины:

$$D[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 \cdot p(x) \cdot dx.$$

Дисперсия результата многократных измерения или дисперсия среднего арифметического значения  $\sigma_{\bar{x}}^2$  в  $n$  раз меньше дисперсии результатов наблюдений  $\sigma_x^2$ , т. е.

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma_x^2 / n.$$

Чем больше дисперсия, тем значительнее рассеяние случайной величины (т. е. результатов наблюдений). Это наглядно видно на рис. 2.4, где представлены кривые плотности одного и того же закона распределения вероятностей при различных дисперсиях, построенные для случая  $M[x] = 0$ . По оси абсцисс графиков рис. 2.4. отложены отклонения  $\Delta x$  значений случайной величины от ее математического ожидания. Кривые плотности распределения вероятности построены для случаев:

$$\sigma_1^2 > \sigma_2^2 > \sigma_3^2.$$

Сравнивая кривые между собой можно отметить, что чем меньше дисперсия, тем больше вероятность того, что большинство отклонений случайной величины будет мало.

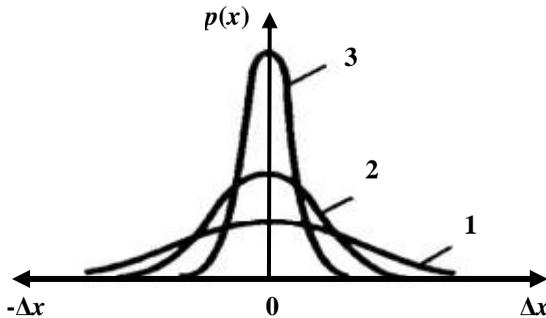


Рис. 2.4. Рассеяние результатов наблюдений

Размерность дисперсии равна квадрату размерности случайной величины, что не всегда удобно, Поэтому в метрологии в качестве меры рассеяния чаще используют *среднее квадратическое отклонение*.

**Среднее квадратическое отклонение** ( $\sigma_x$ ) результатов измерений - положительное значение корня квадратного из дисперсии

$$\sigma_x = +\sqrt{\sigma_x^2} = +\sqrt{D[x]}.$$

**Коэффициент вариации** - отношение среднего квадратического отклонения  $\sigma_x$  к математическому ожиданию (среднему значению) результата измерений.

**Размах** - разность между наибольшим и наименьшим значениями.

Числовой характеристикой *асимметрии* дифференциальной функции распределения вероятности является коэффициент асимметрии. Числовой характеристикой *заостренности* этой функции служит **эксцесс**.

### 2.4.3. Законы распределения вероятностей случайных величин

В метрологии для описания случайных чисел (величин) в основном пользуются следующими законами их распределения: *нормальный* (Гаусса), *равномерный*, *Стьюдента*, *треугольный* (Симпсона), *хи – квадрат* ( $\chi^2$ ) (Пирсона), закон *Фишера*, *экспоненциальный* (показательный) закон и ряд других.

В практической деятельности наиболее часто используют нормальный закон распределения плотности вероятности, характерный тем, что согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, такое распределение имеет сумма большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями. Применительно к измерениям это означает, что нормальное распределение случайных

погрешностей возникает тогда, когда на результат измерения действует множество случайных возмущений, ни одно из которых не является преобладающим. Практически, суммарное воздействие даже сравнительно небольшого числа возмущений приводит к распределению результатов и погрешностей измерений по закону, близкому к нормальному. Кривые нормального распределения приведены на рис. 2.5.

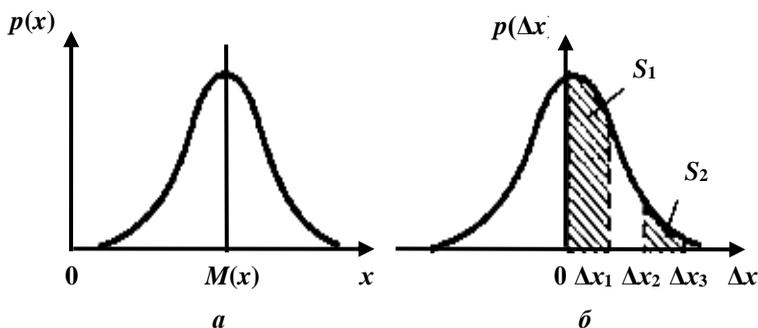


Рис. 2.5. Кривые нормального распределения

Из рис. 2.5.б видно, что кривая распределения погрешностей симметрична относительно оси ординат. Это означает, что погрешности, одинаковые по величине, но противоположные по знаку, имеют одинаковую плотность вероятностей, т. е. при большом числе наблюдений встречаются одинаково часто. Математическое ожидание случайной погрешности равно нулю. Из характера кривой следует, что при нормальном законе распределения малые погрешности встречаются чаще, чем большие, так вероятность появления погрешностей, укладывающихся в интервал от  $0$  до  $\Delta x_1$ , характеризуемая площадью  $S_1$ , будет значительно больше, чем вероятность появления погрешностей в интервале от  $\Delta x_2$  до  $\Delta x_3$  (площадь  $S_2$ ).

Кривые нормального закона распределения с различными значениями средних квадратических отклонений приведены на рис. 2.4.

В метрологической практике часто встречаются также равномерное и треугольное распределение случайных величин.

Если случайная величина  $x$  принимает лишь значения в пределах некоторого конечного интервала от  $a$  до  $b$  с постоянной плотностью вероятностей (рис. 2.6.а), что характерно, например, для показаний многих цифровых приборов, то такое распределение называется *равномерным*.

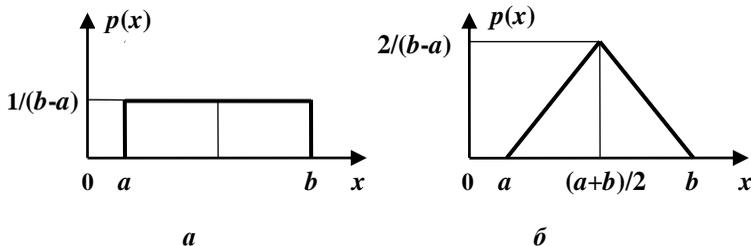


Рис. 2.6. Равномерное (а) и треугольное (б) распределение случайной величины

Композиция двух одинаковых равномерных законов дает так называемый *треугольный* закон Симпсона, график плотности вероятности которого приведен на рис. 2.6.б.

Интегральная функция **нормированного нормального распределения** связана с функцией Лапласа (интегралом вероятности)

$$L(t_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{t_p} e^{-\frac{1}{2} \cdot v^2} \cdot dv$$

соотношением

$$F(t) = 0,5 + L(t_p).$$

Она табулирована в диапазоне значений  $t$  от 0 до 3,5 за пределами которого в сторону больших  $t_p$  практически не отличается от 1.

**Распределением хи - квадрат  $\chi^2$**  называют распределение суммы квадратов **нормированных** нормально распределенных случайных величин

$$\chi_k^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - m_x}{\sigma_x} \right)^2 = \frac{(n-1) \cdot S_x^2}{\sigma_x^2},$$

где  $k = n - 1$  - число степеней свободы;

$n$  - число случайных величин.

**Распределение Стьюдента.** Если  $x$  и  $y$  независимые случайные величины, где  $x$  - нормированная нормально распределенная величина, а  $y$  - случайная величина, распределенная по закону  $\chi^2$  - распределения с  $k$  степенью свободы, то случайная величина

$$T = x / \sqrt{\frac{y}{k}}$$

распределена  $t$  - распределением (или распределение Стьюдента с  $k$  степенью свободы).

Распределение Стьюдента для различных значений следующей дроби

$$t_p = \frac{\bar{x} - m_x}{S_{\bar{x}}} = \frac{\bar{x} - Q}{S_{\bar{x}}} = \frac{\bar{x} - Q}{S_x} \cdot \sqrt{n},$$

называемая дробью Стьюдента приведено в таблице Б.1 приложения Б ( $Q$  - истинное значение величины).

С помощью распределения Стьюдента или таблицы Б.1 может быть найдена вероятность того, что отклонение среднего арифметического от истинного значения измеряемой величины не превышает  $\delta_p = t_p \cdot S_x$

**Распределение Фишера.** Если  $x$  и  $y$  - независимые случайные величины, распределенные  $\chi^2$  - распределением соответственно с  $k_1$  и  $k_2$  степенями свободы, то случайная величина

$$F = \frac{x/k_1}{y/k_2}$$

будет распределена  $F$  распределением Фишера с  $k_1$  и  $k_2$ -ой степенью свободы.

Основные характеристики законов распределения вероятностей случайных чисел (величин), т. е. интегральные и дифференциальные функции некоторых распределений представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Характеристики законов распределения случайных величин

Закон распределения	Функция распределения	
	Дифференциальная	Интегральная
Нормальный (Гаусса)	$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}$	$F(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_0} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx$
Равномерный	$p(x) = \begin{cases} 0; & -\infty < x < a \\ \frac{1}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 0; & b < x < +\infty \end{cases}$	$F(x) = \begin{cases} 0; & -\infty < x < a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b < x < +\infty \end{cases}$
Треугольный (Симпсона)	$p(x) = \begin{cases} 0; & -\infty < x < a \\ \frac{4(x-a)}{(b-a)^2}; & a < x < \frac{a+b}{2} \\ \frac{4(b-x)}{(b-a)^2}; & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0; & b < x < +\infty \end{cases}$	$F(x) = \begin{cases} 0; & -\infty < x < a \\ \frac{2(x-a)^2}{(b-a)^2}; & a < x < \frac{a+b}{2} \\ \frac{2(b-x)^2}{(b-a)^2}; & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1; & b < x < +\infty \end{cases}$
Нормированный (нормальный)	$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2}$ где $t = (x - m_x) / \sigma_x$	$F(t_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t_p} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$
Экспоненциальный односторонний (показательный)	$p(x) = \beta \cdot e^{-\beta x}$	$F(x) = 1 - e^{-\beta x}$

#### 2.4.4. Точечные оценки истинного значения измеряемой величины и среднеквадратического отклонения

В метрологической практике для оценки истинного значения измеряемой величины, т. е. нахождения результата измерения и его погрешности по группе результатов наблюдений необходимо решить статистическую задачу нахождения *точечных оценок параметров функции*

распределения случайной величины на основании *выборки* - ряда значений, принимаемых этой величиной в  $n$  независимых опытах.

Оценка параметра называется *точечной*, если она выражается одним числом. Любая точечная оценка, вычисленная на основании опытных данных, является их функцией и поэтому сама должна представлять собой случайную величину с распределением, зависящим от распределения исходной случайной величины и от числа опытов.

Точечные оценки должны удовлетворять следующим трем требованиям: быть *состоятельными*, *несмещенными* и *эффективными*.

**Состоятельной** называется оценка которая сходится по вероятности к оцениваемой числовой характеристике, т. е. при увеличении количества измерений (объема выборки) отличие оценки от оцениваемого параметра может быть сделано сколь угодно малым.

**Несмещенной** является оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемой числовой характеристике, т.е.

$$M[\bar{x}] = \bar{x}.$$

где  $\bar{x}$  - оцениваемый параметр;

Наиболее **эффективной** считается та из нескольких возможных несмещенных оценок, которая имеет наименьшее рассеяние, т. е. если ее дисперсия меньше дисперсии любой другой оценки данного параметра.

Среднее значение случайного отклонения и случайной погрешности при числе наблюдений, стремящегося к бесконечности, равно нулю т.е.

$$\bar{\delta} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_i = 0.$$

Состоятельной и не смещенной оценкой дисперсии результата измерения или случайной величины (числа) является

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

квадратный корень из которой

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

называется **оценкой среднеквадратического отклонения** или **стандартным отклонением**.

Оценка среднеквадратического отклонения среднего арифметического

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

## 2.5. Влияющие факторы

На измерительный процесс и, соответственно, на результат измерений действуют множество факторов, учет которых представляет иногда достаточно сложную задачу.

Рассмотрение этих факторов следует начать с рассмотрения самого понятия *«измерительный процесс»*, под которым понимают весь объем информации, оборудования и операций, относящихся к данному измерению (МОЗМ, МД № 16). При этом под понятием – *«элемент измерительного процесса»* понимают любой отдельный фактор, способный повлиять на результат измерений. Такими факторами являются:

- объект измерения;
- субъект измерения (оператор);
- метод (способ) измерения;
- средство измерений;
- условия измерений.

Объект измерения должен быть достаточно изучен и сформирована его модель, степень детализации которой

(глубина изучения объекта измерения) должна быть адекватна цели измерения.

Например, при наличии задания - «измерить диаметр вала», можно предположить (составить модель объекта), что сечением вала является круг и провести только одно измерение диаметра, а можно измерить эллиптичность сечения вала. Или, при измерениях площади сельхозугодий обычно пренебрегают кривизной поверхности Земли, чего нельзя делать при определении площади поверхности океанов.

Оператор вносит в измерительный процесс элемент субъективизма, который, по возможности, должен быть уменьшен. Субъективизм оператора зависит от его квалификации, психофизиологического состояния, комфортности (санитарно-гигиенических) условий труда и многого другого.

Большое значение имеют используемые метод и средства измерений. И то и другое должно выбираться в соответствии с назначением (целью) измерительного процесса и условиями его проведения. Необходимо помнить, что средства измерений не только имеют свою собственную погрешность (инструментальная составляющая погрешности измерений), но и могут изменить параметры измеряемого объекта, т.е. влиять на саму измеряемую величину. Например, подключение амперметра или вольтметра для измерений характеристик электрических сигналов меняет параметры самой контролируемой электрической цепи и, соответственно, вносит погрешность в результат измерений.

Условия проведения измерений влияют на все остальные элементы измерительного процесса - на объект измерений, средства измерений, самого оператора.

Например, температура окружающей среды может изменить геометрические размеры измеряемой детали или плотность контролируемой жидкости, т.е. изменить саму измеряемую величину. С другой стороны, изменение температуры окружающей среды изменяет характеристики средств измерений (влияет на инструментальную составляющую погрешности измерений) и влияет на физиологические свойства оператора, т.е. на субъективную погрешность измерений.

Очень часто измерения одной и той же величины различными способами и с помощью различных средств измерений дают совершенно различные результаты. Каждый из этих вариантов имеет свои достоинства и свои недостатки и выбор наиболее оптимального (для данной измерительной задачи) является искусством экспериментатора. В таких случаях не может быть готовых решений и рекомендаций. Практикой измерений накоплен значительный арсенал приемов, позволяющих существенно уменьшить отдельные составляющие систематической погрешности, Целесообразность применения тех или иных приемов определяется по результатам анализа источников возникновения погрешностей и их возможного влияния на конечный результат измерения для каждой конкретной измерительной задачи.

## **2.6. Исключение систематических погрешностей**

### **2.6.1. Основные приемы исключения систематических погрешностей**

Систематические погрешности могут существенно исказить результат измерений. Наибольшую опасность в этом отношении представляют систематические погрешности, о существовании которых даже не подозревают. Именно такие систематические, а не случайные, погрешности были (и являются) причиной ошибочных научных выводов, установления ложных физических законов, брака продукции в производстве.

Исключение систематических погрешностей - одна из главных задач при планировании, подготовке, проведении измерений и обработке их результатов. Способы исключения систематических погрешностей можно разделить на четыре основные группы:

- устранение источников погрешностей до начала измерений (профилактика погрешностей);
- исключение погрешностей в процессе измерения (экспериментальное исключение погрешностей);
- внесение известных поправок в результат измерения (исключение погрешностей путем вычислений);

- оценка границ возможных систематических погрешностей, если их нельзя исключить.

## 2.6.2. Исключение погрешностей до начала измерений

Наиболее рациональным способом исключения систематических погрешностей является **устранение источников погрешностей до начала измерений**, т. к. это позволяет существенно упростить и ускорить процесс измерений.

Под устранением источника погрешностей понимают как непосредственное его удаление (например, удаление источника тепла), так и защиту средств измерений и, при необходимости, объекта измерений от влияния этих источников.

Исключение влияния изменений температуры окружающей среды осуществляют термостатированием и (или) кондиционированием всего помещения лаборатории, термостатированием всего средства измерений или отдельного, наиболее термочувствительного, узла этого средства.

Исключение влияния внешних электромагнитных полей достигается удалением самих источников этих полей или экранированием средств измерений, а, в ряде случаев, и всего рабочего помещения.

Для устранения влияния вибраций и сотрясений применяют специальные амортизаторы или устанавливают средства измерений на массивные фундаменты.

Источники инструментальной погрешности, присущие данному экземпляру средства измерений, устраняют путем регулировки или ремонта средства измерений. Необходимость ремонта устанавливается по результатам предварительной поверки или калибровки этого средства. Таким образом, следует сделать вывод, что перед началом измерений следует обязательно убедиться в метрологической пригодности используемых средств измерений к применению.

Многие погрешности, являющиеся следствием неправильной установки средств измерений, также могут быть исключены до начала измерений. Для этого, в ряде случаев, средства измерений необходимо устанавливать в строго определенных положениях, учитывать требования электромагнитной совместимости средств измерений при их совместном использовании, требования по согласованию

входных и выходных сопротивлений средств измерений и другие.

До начала измерений могут быть исключены и многие субъективные погрешности. Для этого в ряде случаев устанавливаются определенные требования к квалификации оператора или ограничения по некоторым физиологическим параметрам оператора.

Подобных приемов и рекомендаций можно привести достаточно много. Основным правилом по исключению погрешностей до начала измерений является создание таких условий измерений, при которых отдельные составляющие погрешности, обусловленные влияющими факторами, будут иметь минимальные значения.

### 2.6.3. Исключение погрешностей в процессе измерений

Весьма эффективным является экспериментальное **исключение систематических погрешностей в процессе измерений**. При этом исключению поддаются в основном инструментальные погрешности и погрешности, обусловленные внешними влияниями. Исключение погрешностей в процессе измерений осуществляется применением специальных способов измерений, основными из которых являются: способ *компенсации погрешности по знаку*, способы *замещения*, *противопоставления*, *симметричных наблюдений*. Отличительной особенностью указанных способов является необходимость проведения ряда повторных измерений. Поэтому они применимы в основном при измерениях стабильных явлений и параметров. Кроме того, применение перечисленных способов увеличивает продолжительность измерительного процесса и его стоимость.

**Способ замещения** является одним из наиболее рациональных и распространенных способов исключения инструментальных погрешностей. Способ заключается в том, что измеряемый объект замещают в измерительной цепи известной мерой, находящейся в тех же условиях.

Характерным примером является точное измерение массы по способу Борда. Первоначально, измеряемый объект с массой

$m_x$ , расположенный на одной из чашек равноплечих весов уравнивают некой неизменной массой  $m_T$  («тарная» масса). При равновесии считают, что

$$m_x = k \cdot m_T,$$

где  $k$  - коэффициент, обусловленный неравенством между собой длин плеч весов.

Затем убирают объект измерения и прежнее состояние равновесия достигается установкой на первую чашку весов гирь известной массы  $m_0$ . Для повторного состояния равновесия имеем:

$$m_0 = k \cdot m_T.$$

Так как оба измерения проведены в одинаковых условиях можно считать, что

$$m_x = m_0.$$

Таким образом, достигается исключение из результата измерения погрешности, возникшей из-за неравноплечести весов.

Чувствительность равноплечих весов существенно зависит от их нагрузки и обычно имеет наибольшее значение при номинальной нагрузке весов. При этом будет минимальной составляющая погрешности весов, обусловленная их недостаточной чувствительностью (погрешность неполного уравнивания). С целью минимизации погрешности неполного уравнивания весов Д. И. Менделеев модернизировал способ точного взвешивания Борда.

Модернизированный способ замещения состоит в следующем: первоначально на одну из чашек равноплечих весов устанавливают полный комплект гирь известной массы  $M_0$ , соответствующей номинальной нагрузке весов, и уравнивают этот комплект неизменной массой  $M_T$ ; затем на чашку весов с  $M_0$  дополнительно устанавливают измеряемый объект массой  $m_x$ , после чего, для достижения прежнего состояния равновесия снимают часть гирь известной массы,

уменьшая, тем самым, известную массу  $M_0$  на величину  $m_0$ , равную массе измеряемого объекта  $m_x$ .

Способ замещения широко применяется для измерений параметров электрической цепи - электрического сопротивления, емкости, индуктивности. Обычно этот способ применяют при измерении указанных параметров электроизмерительными приборами сравнения.

**Способ компенсации погрешности по знаку** заключается в проведении двух повторных измерений, организованных таким образом, чтобы известная по природе, но неизвестная по значению погрешность входила в результаты этих двух измерений с противоположными знаками. Погрешность исключается при вычислении среднего арифметического результатов измерений.

Пусть  $x_1$  и  $x_2$  - результаты повторных измерений;  $\Delta x$  - систематическая погрешность, известная по природе, но неизвестная по значению;  $x_0$  - значение измеряемой величины, свободное от этой погрешности. Тогда

$$x_1 = x_0 + \Delta x, \quad x_2 = x_0 - \Delta x, \quad \frac{x_1 + x_2}{2} = x_0. \quad (2.6.1)$$

Следует отметить, что указанный способ применяют в основном для исключения погрешностей, источник которых имеет направленное действие - внешнее магнитное поле, температурное поле и т. п.

Например, указанным способом можно исключить погрешность, обусловленную влиянием магнитного поля Земли, если заранее известно, что применяемое средство измерений подвержено такому влиянию. В этом случае первое измерение проводят при любом пространственном положении средства измерений. Перед вторым измерением поворачивают это средство измерений в горизонтальной плоскости на  $180^\circ$ . Если при первом измерении магнитное поле Земли, например, несколько усиливало собственное магнитное поле средства измерений и вызывало положительную погрешность, то при втором измерении это же магнитное поле оказывает противоположное действие.

Способ компенсации погрешности по знаку применяется также и для исключения погрешностей, обусловленных влиянием внешних полей имеющих локальный характер. Однако в этом случае надо иметь уверенность, что внешнее поле, вызывающее погрешность, в области пространства, занимаемого средством измерений, имеет равномерный характер. В противном случае изменение пространственного положения средства измерений может привести не только к изменению знака погрешности, но и ее значения и полной компенсации погрешности не произойдет.

Описанный способ широко применяется при измерениях электрических величин. Например, для исключения погрешностей, обусловленных влиянием термоэлектродвижущих сил, возникающих на переходных контактах электрических цепей, и вызывающих заметные погрешности при измерениях на постоянном токе.

**Способ противопоставления** заключается в том, что измерения проводят два раза таким образом, чтобы причина, вызывающая погрешность, при первом измерении оказала противоположное действие на результат второго измерения. Способ противопоставления имеет большое сходство с уже рассмотренным способом компенсации погрешности по знаку, но, в отличии от него, применяется, в основном, для исключения инструментальных погрешностей.

В качестве примера можно привести способ определения массы на равноплечих весах, предложенный Гауссом для исключения погрешности измерения, обусловленной неравноплечестью весов.

Первоначально измеряемый объект массой  $m_x$  помещают на одну из чашек весов и уравнивают весы гирями массой  $m_1$ . Тогда, для состояния равновесия получим:

$$m_x = m_1 \cdot \frac{l_2}{l_1},$$

где  $l_2/l_1$  - действительное отношение длин плеч весов.

Затем измеряемый объект устанавливают на другую чашку весов (меняют местами измеряемый объект и гири известной

массы) и вторично уравновешивают. Поскольку отношение  $l_2/l_1$  не точно равно единице, равновесие нарушится и для уравновешивания массы  $m_x$  придется использовать гири общей массой  $m_2$ . Тогда для нового состояния равновесия получим:

$$m_2 = m_x \cdot \frac{l_2}{l_1},$$

Решив совместно приведенные равенства получим:

$$m_x = \sqrt{m_1 \cdot m_2}.$$

В данном случае искомый результат ( $m_x$ ) определяется как среднее геометрическое значений  $m_1$  и  $m_2$ .

Так как отношение  $l_2/l_1$  мало отличается от единицы (номинально весы считаются равноплечими), значения  $m_1$  и  $m_2$  близки друг к другу. В этом случае среднее геометрическое значений  $m_1$  и  $m_2$  можно с малой степенью пренебрежения заменить средним арифметическим этих значений. Таким образом окончательно получим:

$$m_x \cong \frac{m_1 + m_2}{2}. \quad 2.6.2)$$

Следует отметить, что соотношения, определяющие значение измеряемой величины, способом компенсации погрешности по знаку (2.6.1) и способом противопоставления (2.6.2) внешне одинаковы. Однако равенство (2.6.1) точно отражает сущность исключения погрешности, а выражение (2.6.2) является приближенным.

Характерной особенностью способа противопоставления является возможность не только исключить погрешность, обусловленную неравноплечеством весов, но и определить действительное отношение длин плеч ( $l_2/l_1$ ), чего другими методами сделать невозможно. Из приведенных соотношений для состояния равновесия получим:

$$\frac{l_2}{l_1} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \sqrt{1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1}} \approx 1 + \frac{m_2 - m_1}{2 \cdot m_1}.$$

Способ противопоставления широко применяется и при измерениях электрического сопротивления уравновешенными мостами постоянного тока.

**Способ симметричных наблюдений** применяется для исключения прогрессивной погрешности, являющейся линейной функцией времени. Способ симметричных наблюдений заключается в том, что измерения проводятся последовательно через одинаковые промежутки времени. При обработке используют свойство результатов двух любых наблюдений, симметричных относительно средней точки интервала наблюдений. Это свойство состоит в том, что погрешности результатов любой пары симметричных наблюдений равно погрешности, соответствующей средней точке интервала.

Функцию прогрессивной погрешности можно представить в виде графика (рис. 2.7.).

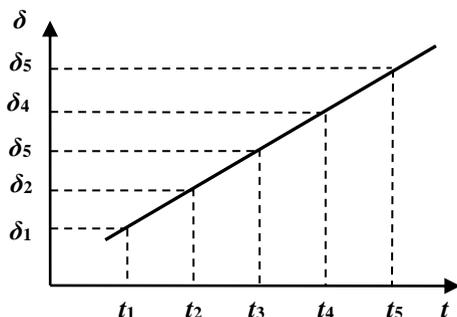


Рис. 2.7. График прогрессивной погрешности

Например, было проведено пять наблюдений, которые были начаты в момент времени  $t_1$ , когда погрешность имела значение  $\delta_1$ . Нетрудно показать, что при нечетном числе наблюдений:

$$\frac{\delta_1 + \delta_5}{2} = \frac{\delta_2 + \delta_4}{2} = \delta_3.$$

Число наблюдений может быть и четным, тогда

$$\frac{\delta_1 + \delta_4}{2} = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2}.$$

При трех наблюдениях (минимальное число наблюдений) и при начальной погрешности, равной нулю, вычисления упрощаются.

Примером реализация способа симметричных наблюдений может служить поверка (калибровка) термоэлектрических измерительных преобразователей температуры (термопар). Для повышения производительности, в печь вместе с образцовой термопарой одновременно загружают несколько (например, четыре) однотипных поверяемых термопар и поочередно измеряют электродвижущие силы (э. д. с.) образцовой ( $e_0$ ) и поверяемых ( $e_i$ ) термопар. Поскольку измерения этих э. д. с. происходят не в один и тот же момент времени возможна значительная погрешность измерений, обусловленная монотонным изменением температуры печи. Для исключения указанной погрешности э. д. с. измеряют через равные промежутки времени в следующей последовательности:

$$e_0 \rightarrow e_1 \rightarrow e_2 \rightarrow e_3 \rightarrow e_4 \rightarrow e_0 \rightarrow e_4 \rightarrow e_3 \rightarrow e_2 \rightarrow e_1 \rightarrow e_0.$$

Затем рассчитывают средние арифметические значения э. д. с. одноименных термопар. Эти значения будут соответствовать температуре печи, которая имела место в момент времени, равный середине временного интервала всего цикла измерений.

Способом симметричных наблюдений рекомендуют пользоваться и тогда, когда существование прогрессивной погрешности не является очевидным. Ряд измерений, проведенных в указанном порядке в сочетании с тем или иным способом исключения постоянной погрешности, позволит выявить и исключить и прогрессивную погрешность, если она имеется.

Эффективным способом уменьшения постоянных систематических погрешностей в процессе измерений является их *рандомизация*, т. е. перевод в случайные. Например, если какую-либо величину измерять одновременно несколькими экземплярами одноптипных приборов (или несколькими приборами разных типов) и вычислить среднее арифметическое полученных показаний, то можно ожидать, что систематические погрешности, присущие каждому конкретному экземпляру используемых приборов, в совокупности проявят себя как случайные величины.

#### **2.6.4. Исключение систематических погрешностей путем внесения поправок**

Значение величины  $x^*$ , полученное с помощью средств измерений, как правило, содержит систематическую погрешность, и называется *неисправленным результатом измерений*.

Эта систематическая погрешность может быть исключена вычислением *после окончания процесса измерений* путем *внесения известных поправок* в неисправленный результат измерений.

Наиболее распространенным способом внесения поправок является алгебраическое сложение результата измерения и поправки (с учетом ее знака). В этом случае поправка по числовому значению равна систематической погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины (абсолютной погрешности) и противоположна ей по знаку. Поправки, вносимые суммированием, называются *аддитивными*.

В других случаях погрешность исключают путем умножения результата измерения на поправочный множитель. Такие поправки называются *мультипликативными*.

Введением поправки исключается только одна, вполне определенная систематическая погрешность, поэтому в результат измерения часто приходится вносить значительное число поправок.

Простейшим примером может служить уточнение значения массы объекта, полученного путем взвешивания на равноплечих весах.

$$m_x = k \cdot (m_n + q), \text{ в свою очередь, } q = m_0 - m_n;$$

где:  $m_x$  - уточненное значение массы измеряемого объекта (исправленный результат измерения);

$k = l_2/l_1$  - поправочный множитель равный отношению действительных значений длин плеч весов (мультипликативная поправка);

$m_n$  - номинальное значение массы уравнивающих гирь;

$q$  - поправка к номинальному значению массы гирь (аддитивная поправка);

$m_0$  - действительное значение массы гирь.

Чтобы тем или иным из описанных способов внести поправки в результат измерений, необходимо, прежде всего, определить эти поправки, для чего средства измерений предварительно следует подвергать калибровке.

Таким образом, в большинстве случаев поправки, необходимые для исключения инструментальной погрешности, находят *экспериментальным путем*.

Для исключения методической погрешности необходимо знать те параметры применяемой аппаратуры, параметры объекта измерения и значения влияющих величин, которые позволят вычислить поправки к результату измерения (если они вообще поддаются вычислению). Поэтому чаще всего поправки, необходимые для исключения методической погрешности, находят *путем вычислений*.

При уточнении результата измерения путем введения поправок необходимо помнить, что погрешность результата измерений принято выражать не более чем двумя значащими цифрами, поэтому поправка, если она меньше пяти единиц разряда, следующего за последним десятичным знаком погрешности результата, будет все равно потеряна при округлении, и вводить ее не имеет смысла.

### **2.6.5. Оценка границ неисключенных систематических погрешностей**

В ряде случаев исключение систематических погрешностей оказывается практически невозможным. В таких случаях проводится *оценка границ возможных систематических погрешностей*. Прежде всего, это относится к методам измерений, систематические погрешности которых недостаточно изучены.

В общем виде систематическая погрешность, остающаяся после введения поправок включает в себя ряд элементарных составляющих, называемых *неисключенными остатками систематической погрешности*.

Элементарные составляющие неисключенных систематических погрешностей имеют вполне определенное значения, но эти значения обычно не известны. Известно лишь то, что они лежат в определенных границах  $\pm \Theta_{\max}$  и имеют определенные оценки среднего квадратического отклонения (СКО)  $S_{\Theta}$ .

Неисключенная систематическая погрешность результата измерения (далее для краткости - систематическая погрешность измерения) образуются, как уже было отмечено, из составляющих, в качестве которых могут быть неисключенные остатки систематической погрешности метода, инструментальных и субъективных систематических погрешностей.

Если систематическая погрешность имеет место только у одной из составляющих (погрешности или метода, или средств измерения, или оператора), то систематическую погрешность результата выражают *границами этой погрешности*  $\pm \Theta$ .

В качестве границ составляющих систематической погрешности принимают, например, пределы допускаемых основных (определяемые при заранее установленных – «нормальных» условиях) и дополнительных (определяемые при условиях, отличающихся от нормальных) погрешностей средств измерений.

При наличии нескольких (но не более трех) систематических погрешностей, заданных своими границами  $\Theta_i$ , систематическую погрешность результата выражают также границами систематической погрешности, вычисляемые по формуле

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^n |\Theta_i|. \quad (2.6.3)$$

Если же число систематических погрешностей, заданных своими границами  $\Theta_i$ , более трех, то при суммировании их рассматривают как случайные величины, вероятности которых распределены равномерно. При этом систематическую погрешность результата измерения вычисляют путем построения композиции систематических погрешностей средств измерений (инструментальных погрешностей), метода и погрешностей, вызванных другими источниками, например, температурой, влажностью и давлением окружающей среды и выражают *доверительными границами* систематической погрешности  $\Theta(P)$  (без учета знака) и вычисляют по формуле:

$$\Theta(P) = \pm K \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \Theta_i^2}, \quad (2.6.4)$$

где:  $n$  - количество систематических погрешностей;

$K$  - коэффициент, значение которого выбирают в зависимости от доверительной вероятности  $P$  и прочих параметров.

Например, при  $P=0,68$ ,  $K=1,0$ ; при  $P=0,95$ ,  $K=1,1$ ; при  $P=0,99$ ,  $K=1,4$ .

Границы систематической погрешности  $\Theta(P)$  косвенного измерения рассчитываются также по формулам (2.6.3) - (2.6.6), путем подстановки значения  $\Theta_i$ , рассчитываемого по формуле:

$$\Theta_i = \Theta_z = \frac{\partial F}{\partial x_j} \cdot S_{\Theta}, \quad (2.6.5)$$

где:  $\Theta_z$  - систематическая погрешность косвенного измерения;

$z$  - величина, измеряемая косвенно;

$F$  - функция, описывающая зависимость величины  $z$  от других величин, непосредственно подвергаемым прямым измерениям;

$x_j$  -  $j$ -й аргумент (непосредственно измеряемая величина)

$\frac{\partial F}{\partial x}$  - частная производная функции  $F$ .

В свою очередь  $\Theta_z$  определяется в следующем виде:

$$\Theta_z = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial^2 F}{\partial x_j^2} \right) \cdot S_{\bar{x}_j}^2, \quad (2.6.6)$$

где:  $m$  - число аргументов (непосредственно измеряемых величин).

Результирующая систематическая погрешность характеризуется также оценкой средней квадратической погрешности (СКП) или оценкой среднего квадратического отклонения (СКО) суммы неисключенных систематических погрешностей, вычисляемая в соответствии с ГОСТ 8.207-76, ГОСТ 8.381-80 по формуле:

$$S_{\Theta} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^n \Theta_i^2}. \quad (2.6.7)$$

Если вероятности нескольких ( $n_1$ ) отдельных неисключенных остатков систематической погрешности распределены по равномерному закону, а других ( $n_2$ ) - по нормальному закону, то

$$S_{\Theta} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} \Theta_i^2 + \sum_{j=1}^{n_2} S_{\Theta_j}^2}. \quad (2.6.8)$$

Возможны также случаи, когда систематические погрешности измерений хорошо изучены, поддаются определению, однако не могут быть использованы для внесения поправок в результаты измерений.

Такие ситуации возникают, обычно, когда результаты измерений получены с использованием достаточно обширной

группы средств измерений - интегрирующих приборов, чаще всего носящих наименование счетчиков. К таким приборам относятся счетчики расхода газа, воды, электрической и тепловой энергии.

Погрешности счетчиков, как правило, непостоянны по диапазону измерений (зависят от значения измеряемой величины). Не смотря на то, что значения погрешностей счетчиков, соответствующие каждому конкретному значению измеряемой величины известны, внесение поправок в результат измерения возможно только при работе счетчика в строго определенном режиме - при неизменном значении входной величины. На практике такие режимы работы интегрирующих приборов встречаются крайне редко.

В реальных условиях эксплуатации значения измеряемой величины за контролируемый промежуток времени меняются в широких пределах. Например, для современных счетчиков электрической энергии отношение верхнего и нижнего пределов измерения может составлять несколько сотен. Поскольку показания счетчика определяются нарастающим итогом измеряемого расхода контролируемой величины за определенный промежуток времени невозможно выделить показание прибора, соответствующее конкретному значению измеряемой величины. Кроме того, знак погрешности прибора может изменяться при изменении значения измеряемой величины, что в сумме приведет к некоторой компенсации погрешности.

Таким образом, в описанной ситуации нет возможности определить результирующую погрешность, а следовательно, и подлежащую внесению поправку. Можно только отметить, что если систематическая погрешность применяемого счетчика не выходят за пределы  $\pm \Theta_{\max}$ , то и погрешность измерения, в конечном итоге, не превышает этого значения.

## **2.7. Характеристики случайной погрешности**

### **2.7.1. Количественные оценки рассеяния результатов измерений**

Обычно результаты ряда равноточных измерений одной и той же величины несколько отличаются друг от друга. Это отличие результатов (рассеяние), как правило, обусловлено действием случайных погрешностей. При этом *равноточными измерениями* принято называть ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений, в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью.

Количественную оценку рассеяния результатов в ряду измерений вследствие действия случайных погрешностей обычно получают после исправления результатов измерений (исключения систематических погрешностей) путем введения поправок.

Оценками рассеяния результатов в ряду измерений могут быть:

- размах результатов измерений (размах)  $R_n$ ;
- средняя арифметическая погрешность единичного измерения (в ряду измерений)  $r$ ;
- средняя квадратическая погрешность (или среднее квадратическое отклонение - СКО) единичного измерения (в ряду равноточных измерений)  $S_x$ ;
- средняя квадратическая погрешность (или среднее квадратическое отклонение СКО, или стандартное отклонение) результата измерений (или среднего арифметического)  $S_{\bar{x}}$ ;
- доверительные границы погрешности единичного измерения (в ряду равноточных измерений)  $\varepsilon_x$ ;
- доверительные границы погрешности результата измерений (или среднего арифметического)  $\varepsilon_{\bar{x}}$ .

**Размах результатов измерений (размах)** - разность между наибольшим  $x_{\max}$  и наименьшим  $x_{\min}$  значениями величины в данном ряду измерений.

**Средняя арифметическая погрешность единичного измерения** (в ряду измерений) - обобщённая характеристика рассеяния результатов равноточных независимых измерений, входящих в ряд из  $n$  измерений, вычисляемая по формуле:

$$r = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|, \quad (2.7.1)$$

где:  $r$  - средняя арифметическая погрешность - среднее арифметическое значение абсолютных значений  $i$ -ых погрешностей, присущих ряду измерений;

$x_i$  - результат  $i$ -го измерения, входящего в ряд измерений;

$\bar{x}$  - среднее арифметическое из  $n$  значений величины;

$(x_i - \bar{x})$  - абсолютное значение погрешности  $i$ -го измерения.

### 2.7.2. Среднее квадратическое отклонение погрешности измерений

**Средняя квадратическая погрешность (или оценка среднего квадратического отклонения (СКО), или стандартное отклонение) результата измерений (или среднего арифметического)  $S_x^-$  - оценка случайной погрешности среднего арифметического значения результата прямых много кратных измерений одной и той же величины в данном ряду измерений, вычисляемая по формуле**

$$S_x^- = S(\bar{x}) = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.7.2)$$

где:  $S_x^-$  - **средняя квадратическая погрешность [или оценка среднего квадратического отклонения (СКО) единичного измерения (в ряду равноточных измерений)]**, т. е. оценка рассеяния единичных (отдельных) результатов измерений в ряду прямых многократных равноточных измерений одной и той же величины около среднего их значения, вычисляемая по формуле:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.7.3)$$

где:  $x_i$  - результат  $i$ -го единичного измерения;

$\bar{x}$  - среднее арифметическое значение измеряемой величины из  $n$  единичных результатов.

Из (2.7.2) следует, что СКО результата измерений (или среднего арифметического)  $S_{\bar{x}}$  в  $\sqrt{n}$  раз меньше СКО единичного измерения (в ряду равноточных измерений)  $S_x$ . Поэтому для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения проводят многократно.

При косвенных измерениях, т. е. когда значения искомой величины  $z$  получают на основании известной зависимости, связывающей ее с другими, непосредственно (прямыми измерениями) измеряемыми (исходными) величинами  $x_j$ :

$$z = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) = F(x_j); \quad j=1, 2, 3, \dots, m \quad (2.7.4)$$

среднее арифметическое (наиболее достоверное) значения косвенно измеряемой величины  $z$  определяют двумя, отличающимися друг от друга методами.

Первый метод заключается в подстановке в формулу (2.7.4) средних арифметических значений  $x_j$  непосредственно (прямо) измеряемых (исходных) величин, т. е.

$$\bar{z} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_m) = F(\bar{x}_j), \quad j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (2.7.5)$$

Второй метод используется при наличии корреляции между погрешностями непосредственно измеряемых величин, и рассчитывается по формуле:

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n z_i. \quad (2.7.6)$$

Среднюю квадратическую погрешность результата косвенных измерений величины вычисляют по формуле:

$$S_{\bar{z}} = S(\bar{z}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial F}{\partial x_j} \right)^2 \cdot S^2(\bar{x}_j) + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial x_j} \right) \cdot r_{i,j} \cdot S(\bar{x}_i) \cdot S(\bar{x}_j)}, \quad (2.7.7)$$

где:  $\frac{\partial F}{\partial x_j} S(\bar{x}_j)$  - частные погрешности косвенного

измерения;

$r_{ij}$  - коэффициент корреляции между погрешностями средних арифметических  $\bar{x}_i$  и  $\bar{x}_j$ .

Значение частных производных  $\partial F / \partial x_j$  вычисляются при средних арифметических значениях аргументов  $\bar{x}_j$ .

Если  $r_{ij} = 0$ , то средняя квадратическая погрешность результата косвенных измерений величины, согласно (2.7.7) вычисляется по формуле:

$$S_{\bar{z}} = S(\bar{z}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial F}{\partial x_j} \right)^2 \cdot S^2(\bar{x}_j)}. \quad (2.7.8)$$

Если же среднее арифметическое значение косвенно измеряемой величины  $z$  определено по формуле (2.7.6), то оценку среднего квадратического отклонения (СКО) рассчитывают по формуле (2.7.2) или (2.7.3), подставляя вместо  $x_i$  и  $\bar{x}$ , соответственно  $z_i$  и  $\bar{z}$ .

Формулы (2.7.2) и (2.7.3) применимы только для результатов измерений подчиняющихся нормальному закону распределения вероятностей. Если закон распределения вероятностей не известен, то СКО рассчитываются по формулам:

$$S_{\bar{x}} = S(\bar{x}) = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - \bar{x}^2)}, \quad (2.7.9)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^2 - \bar{x}^2)} \quad (2.7.10)$$

На практике широко распространён термин «*среднее квадратическое отклонение*» (СКО). Под отклонением понимается отклонение единичных результатов в ряду

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

### 2.7.3. Доверительный интервал и доверительные границы погрешности измерений

Интервал значений случайной погрешности, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений называют *доверительным интервалом* погрешности результата измерений. Доверительный интервал погрешности определяется зоной, равной  $2 \cdot t \cdot S(x)$  для каждого (отдельного) измерения в ряду измерений и  $2 \cdot t \cdot S(\bar{x})$  для результата измерений (среднего арифметического); где  $t$  - коэффициент, зависящий от доверительной вероятности  $P$ , числа измерений  $n$ , закона распределения вероятности и ряда других классификационных характеристик измерений.

Верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала называют *доверительными границами погрешности измерений*. Доверительные границы погрешности единичного измерения (в ряду равноточных измерений)  $\varepsilon_x$  и доверительные границы погрешности результата измерений (или среднего арифметического)  $\varepsilon_{\bar{x}}$  рассчитываются в виде:

$$\varepsilon_x = t \cdot S_x, \quad \varepsilon_{\bar{x}} = t \cdot S_{\bar{x}} \quad (2.7.11)$$

Коэффициент  $t$  в зависимости от вида или классификационных характеристик измерений определяются следующим образом:

- если оценка СКО  $S(x)$  или  $S(\bar{x})$  определены экспериментально при ограниченном числе измерений ( $n < 30$ ), т. е. по формулам (2.7.2) и (2.7.3) то коэффициент  $t$  называется коэффициентом, точнее квантилем распределения Стьюдента, и рассчитывается по формуле распределения Стьюдента, или, проще, определяется по таблице (см. таблицу Б.1 приложения Б), соответствующий доверительной вероятности  $P = 1 - q$  и числу степеней свободы  $f = n - 1$ , ( $n$  - число измерений,  $q$  - уровень значимости);

- если оценка СКО  $S(x)$  или  $S(\bar{x})$  определены экспериментально при достаточно большом числе измерений ( $n > 30$ ), или она приведена в нормативных или технических документах, или задана (известна) дисперсия  $\sigma^2$  или среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  то коэффициент  $t$  представляет собой квантиль нормального распределения для доверительной вероятности  $P$  и рассчитывается используя интегральную функцию нормированного нормального распределения; для этого задается доверительная вероятность  $P$ , например,  $P = 0,95$ , затем по формуле

$$F(t) = \frac{P + 1}{2} \quad (2.7.11a)$$

определяют соответствующее значение интегральной функции  $F(t)$  нормированного нормального распределения и по таблице (см. таблицу Б.2 приложения Б) находят значения коэффициента  $t$ ;

- если измерение является косвенным и оценки СКО  $S(x)$  или  $S(\bar{x})$  определены по формулам (2.7.7) или (2.7.8), то коэффициент  $t$  Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности  $P = 1 - q$  и числу степеней свободы  $f_{\text{эф}}$ , определяется по таблице (см. таблицу Б.1 приложения Б).

Эффективное число степеней свободы  $f_{\text{эф}}$  (при одинаковом числе измерений аргументов  $x_i$ , т. е.  $n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n$ ) вычисляется по формуле;

$$f_{\text{эф}} = \frac{(n+1) \cdot \left( \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \cdot S^2(\bar{x}_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^4 \cdot S^4(\bar{x}_i)} - 2, \quad (2.7.12)$$

где:  $n_i$  - число измерений  $x_i$ ;

$m$  - число аргументов;

$q$  - уровень значимости.

Формулы (2.7.11) пригодны для расчета доверительных границ погрешности измерения, если погрешность измерения распределены по нормальному закону распределения вероятности.

На рис. 2.8. приведен график нормального распределения погрешностей, по оси абсцисс которого отложены интервалы с границами  $\pm\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$ ,  $\pm 3\sigma$ ,  $\pm 4\sigma$ . Доверительные вероятности для этих интервалов приведены в таблице 2.3.

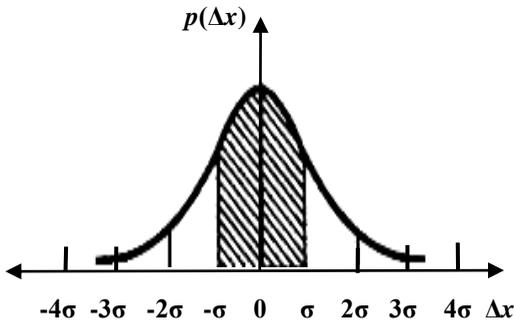


Таблица 2.3.

$t \cdot \sigma$	$P$
$\pm\sigma$	0,68
$\pm 2\sigma$	0,95
$\pm 3\sigma$	0,997
$\pm 4\sigma$	0,999

Рис 2.8. К понятию доверительных интервалов

Как следует из таблицы 2.3, оценка случайной погрешности группы наблюдений интервалом  $\pm\sigma$  соответствует доверительной вероятности 0,68. Такая оценка не дает уверенности в высоком качестве измерений, поскольку 32 % от всего числа наблюдений может выйти за пределы указанного интервала, что совершенно неприемлемо при однократных измерениях и дезинформирует пользователя измерительной информации. Доверительному интервалу  $\pm 3\sigma$  соответствует  $P = 0,997$ . Это означает, что практически с вероятностью очень близкой к единице ни одно из возможных значений погрешности при нормальном ее распределении не выйдет за границы интервала. Поэтому, при нормальном распределении погрешностей, доверительную границу  $\pm 3\sigma$  принимают за предельную (максимальную) доверительную границу погрешности, соответственно погрешность – за *предельную погрешность измерения в ряду измерений (предельная погрешность)*. В целях единообразия в оценивании случайных погрешностей интервальными оценками при технических измерениях доверительная вероятность принимается равной 0,95. Лишь для особо точных и ответственных измерений допускается применять более высокую доверительную вероятность.

В тех случаях, когда закон распределения неизвестен, для расчета доверительных границ погрешности измерения, используется формула (2.7.13), вытекающая из известного неравенство Чебышева)

$$\varepsilon_x = \sqrt{1-P} \cdot S_x, \quad \varepsilon_{\bar{x}} = \sqrt{1-P} \cdot S_{\bar{x}} \quad (2.7.13)$$

В этом случае СКО  $S_x$  и  $S_{\bar{x}}$  рассчитываются по формулам (2.7.10) и (2.7.9) соответственно.

#### 2.7.4. Суммарная погрешность результата измерения

Погрешность результата измерений представляет собой сумму случайной и систематической погрешности измерений.

Задача суммирования случайной и систематической составляющих погрешности измерений на практике решается обычно в рамках того или иного приближенного подхода, позволяющего получить интервальную характеристику результирующей погрешности.

В соответствии с концепцией рандомизации систематических погрешностей систематическая составляющая рассматривается как вырожденная центрированная случайная величина, включающая ряд независимых составляющих. Постоянные (известные) систематические погрешности исключают из результатов измерений введением поправок.

Хорошо известным примером такого приближенного подхода является установленный стандартами ГОСТ 8.207-76 и ГОСТ 8.381-80 метод, определяющий *доверительные границы суммарной погрешности* результата измерений, т. е. наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений. При симметричных границах термин может применяться в единственном числе – «**доверительная граница**». Иногда вместо термина «доверительная граница» применяют термин «**доверительная погрешность**» или «**погрешность при данной доверительной вероятности**».

Доверительные границы суммарной погрешности результата измерений  $\Delta$  согласно упомянутым стандартам рассчитываются по формуле

$$\Delta = t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}, \quad (2.7.14)$$

с коэффициентом

$$t_{\Sigma} = \frac{\Theta + \varepsilon_{\bar{x}}}{S_{\Theta} + S_{\bar{x}}}, \quad (2.7.15)$$

и оценкой суммарной средней квадратической погрешности результата измерений  $S_{\Sigma}$  (суммарная погрешность результата измерений, состоящая из случайных и неисключенных систематических погрешностей), вычисляемая по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\bar{x}}^2 + S_{\Theta}^2}, \quad (2.7.16)$$

где:  $\Theta$  - граница суммы неисключенных систематических погрешностей результата измерений, вычисляемая по формуле (2.6.3) или (2.6.4);

$\varepsilon(\bar{x})$  - доверительные границы случайной погрешности результата измерений, вычисляемая по формуле (2.7.11) или (2.7.13);

$S_{\bar{x}}$  - оценка средней квадратической погрешности (СКО) результата измерений, вычисляемая по формуле (2.7.2) или (2.7.9);

$S_{\Theta}$  - средняя квадратическая погрешность суммы неисключенных систематических погрешностей, вычисляемая по формуле (2.6.7) или (2.6.8).

Как показано в МИ 2083-90 относительная погрешность приближения (2.7.14) и (2.7.17), которая зависит от доверительной вероятности и соотношения случайной и систематической составляющих, не превышает: 2 %, для  $P = 0,90$ ; 6 %; для  $P = 0,95$ ; и 12 %, для  $P = 0,99$ . Эти значения погрешности представляют собой «оценку сверху», поскольку точное решение по условиям задачи отвечает композиции нормального и равномерного распределений, тогда как распределение результирующей систематической погрешности равномерным уже не является и с увеличением числа составляющих все более приближается к нормальному.

С учетом (2.7.14) - (2.7.16) получим формулу для расчета доверительной границы суммарной погрешности результата измерений (погрешности измерений)  $\Delta$

$$\Delta = \frac{\Theta + \varepsilon_{\bar{x}}}{S_{\Theta} + S_{\bar{x}}} \cdot \sqrt{S_{\bar{x}}^2 + S_{\Theta}^2}. \quad (2.7.17)$$

Как следует из (2.7.17) суммарная погрешность определяется оценкой случайной составляющей погрешности измерений  $S_{\bar{x}}$ , оценкой СКО систематической составляющей

погрешности измерений  $S_{\Theta}$ , доверительной границей систематической составляющей погрешности измерения  $\Theta$  и доверительной границей случайной составляющей погрешности  $\varepsilon_{\bar{x}}$ .

В некоторых случаях, при выполнении ниже приведенных условий, с целью упрощения обработки результатов измерений, особенно с целью избежания громоздких расчетов, например, эффективного числа степеней свободы  $f_{\text{эф}}$ , согласно ГОСТ 8.207-76, МИ 1552-86, МИ 2083-90 за погрешность результата измерений принимают:

- неисключенную систематическую составляющую погрешности, если  $\Theta/S_x > 8$ ;
- случайную составляющую погрешности, если  $\Theta/S_x < 0,8$ .

## 2.8. Обработка результатов измерений

Как уже отмечалось в главе 1, целью измерения является получения значения интересующей наблюдателя величины с известными характеристиками погрешности измерения этой величины.

Получение значения величины означает определение действительного значения величины, за которое обычно принимают среднее арифметическое или среднее взвешенное значения.

Расчет упомянутых характеристик измерения производится по различным, отличающимся друг от друга, математическим формулам (уравнениям) в зависимости от того, к какому классу измерений оно относится.

Следовательно, процесс и порядок математической обработки однократного и многократного измерений, прямого и косвенного, равноточного (равнорассеянного) и неравноточного измерений различны. Также отличаются обработка нескольких рядов измерений, обработка результатов измерений, подчиняющихся и не подчиняющихся нормальному закону распределения вероятностей. Указанные частные случаи следует рассмотреть в отдельности.

### 2.8.1. Обработка результата однократных измерений

За результат однократного измерения принимают значение величины, полученное при отдельном измерении. Измерения проводят один раз только в том случае, если заранее (априорно) известны составляющие погрешности результата измерений. Однократные измерения проводятся в следующих случаях:

- производственная необходимость (экономическая целесообразность), невозможность повторения измерения, например, при первом же измерении необходимо разрушить объект измерения;

- возможность пренебрежения случайными погрешностями (они или пренебрежимо малы по сравнению с неисключёнными систематическими погрешностями, или их доверительная граница не превышает допускаемой погрешности измерения).

Оценивание погрешности результатов однократных измерений осуществляют в соответствии с методическими указаниями МИ 1552-86.

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

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

### 2.8.2. Обработка результатов многократных измерений

Обработка результатов многократных измерений осуществляется в соответствии с ГОСТ 8.207-76, ГОСТ 8.381-80, МИ 1552-86, МИ 2083-90 в последовательности, приведенной в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

## Последовательность обработки результатов измерений

Выполняемые операции	Номер используемой формулы, таблицы, раздела, пункта			
	Измерения			
	прямые		косвенные	
	Распределение:			
	нормальное	не нормальное	нормальное	не нормальное
1. Исключают систематические погрешности путем введения поправок	пункт 2.6.4.			
2. Вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины	пункт 2.4.2; 2.4.1.	2.7.5; 2.7.6.	2.7.5; 2.7.6.	
3. Определяют наличие и исключают грубые погрешности	2.8.1; таблица Б.3.			
4. Проверяют гипотезу о нормальности распределения результатов измерений	пункт 2.8.2.2.			
5.1 Вычисляют оценки СКО $S_x$	2.7.3.	2.7.9.		
5.2 Вычисляют оценки $СКО S_{\bar{x}}$	2.7.2.	2.7.10.	2.7.7; 2.7.8.	
6. Вычисляют доверительные границы случайных погрешностей и	2.7.11	2.7.13	2.7.11	2.7.13
7. Определяют границы неисклученной систематической погрешности	2.6.3	2.6.3	2.6.3; 2.6.4; 2.6.6	
8. Вычисляют доверительные границы погрешности результата	2.7.14; 2.7.15; 2.7.16; 2.7.17			

измерения	
-----------	--

Результаты измерения, в соответствии с МИ 1317-86, записывают в следующем виде:

-  $\bar{x} + \Delta, P$ ; если доверительные границы погрешности измерения симметричны (где  $\Delta = \Delta x_{\Sigma}$  - суммарная погрешность результата измерений); это означает, что истинное значение измеренной величины с вероятностью  $P$  находится в доверительном интервале  $[\bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta]$ ;

-  $\bar{x}; S_{\bar{x}}; n; \Theta$ ; если отсутствуют данные о виде функции распределения составляющих погрешности и намечаются дальнейшая обработка результатов или анализа погрешностей; в случае, если границы неисключенной систематической погрешности вычислены по формуле (2.6.4), следует дополнительно указать доверительную вероятность  $P$ .

Числовые значения результата измерения должны оканчиваться цифрами того же десятичного разряда, что и значение погрешности.

### 2.8.2.1. Обнаружение грубых погрешностей измерений

Грубые погрешности обнаруживают и исключают, основываясь на критериях оценки аномальности результатов измерений. Для проверки гипотезы о том, что результат измерения  $x_i$  не содержит грубые погрешности следует воспользоваться распределениями величин:

$$t = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{S_x} \quad \text{или} \quad t = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{S_x}. \quad (2.8.1)$$

Если  $t < (t)_{\max}$ , [где  $(t)_{\max}$  определяется по таблице (см. таблицу Б.3)], то гипотеза принимается. В противном случае ее следует отвергнуть, как противоречащую данным измерений и следует отбросить этот результат, т. е. не принимать его во внимание при дальнейшей обработке результатов наблюдений.

В случае обнаружения и исключения промаха расчёт среднего арифметического исправленных результатов измерений и оценка СКО результата измерений проводится заново уже для числа измерений  $n^* = n - m$ , где  $m$  - число обнаруженных промахов.

В ряде областей измерений погрешность  $(x_i - \bar{x})$ , превышающую  $3 \cdot S_x$  (или  $3 \cdot \sigma$ ) с вероятностью 0,997 считают промахом. Это правило называется *правилом трех сигм*.

### 2.8.2.2. Проверка нормальности распределения результатов измерений

Проверку нормальности распределения результатов измерений проводят после исключения грубых погрешностей (результатов) измерений. Методы проверки нормальности распределения результатов измерений зависят от числа измерений  $n$ . Они коренным образом отличаются друг от друга. Рассмотрим некоторые из них.

**Если число измерений  $n$  более 40**, то проверку осуществляют, используя критерий Пирсона. Идея этого метода состоит в контроле отклонений гистограммы экспериментальных данных от гистограммы с таким же числом интервалов, построенной на основе распределения, совпадение с которым определяется. Проверка нормальность распределения результатов измерений осуществляется в следующей последовательности:

1. Результаты измерений группируют по интервалам и подсчитывают частоты  $m_i$ , т. е. число результатов измерений, лежащие в  $i$ -м интервале.

2. Определяют частоту

$$P_i^* = m_i / n,$$

представляющую собой статистическую оценку вероятностей попадания результата измерений в  $i$ -й интервал.

3. Рассчитывают число степеней свободы

$$k = r - s - N,$$

где:  $r$  - число интервалов;  
 $N$  - число объединения интервалов;  
 $s$  - число независимых связей, наложенных на частоты  
(для нормального распределения  $s = 3$ ).

Число  $r$  интервалов выбирается в зависимости от числа  $n$  измерений. Например, при числе  $n$  измерений от 40 до 100, число интервалов  $r$  выбирают в пределах от 7 до 9, а при  $n = 100 \dots 500$ ,  $r = 8 \dots 12$ .

4. Вычисляются среднее арифметическое значение искомой величины и СКО  $S_x$  соответственно по формулам (2.4.1) и (2.7.3).

5. Определяют теоретическую доверительную вероятность  $P_i$  попадания результата в  $i$ -й интервал.

6. Вычисляют меру расхождения  $\chi_k^2$  теоретического и статистического распределения по формуле

$$\chi_k^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n}{P_i} \cdot (P_i^* - P_i). \quad (2.8.2)$$

7. Задаваясь уровнем значимости  $q = I - P$  находят по таблице Б.4 приложения Б значения  $\chi_{k,q/2}^2$  и  $\chi_{k,1-q/2}^2$ . Если,  $\chi_{k,q/2}^2 \leq \chi_{k,1-q/2}^2$  то распределение с вероятностью  $P$  считают нормальным.

**Если число измерений  $n$  меньше 40 но более 11, то нормальность распределения результатов наблюдений проверяется с помощью метода двух (составных) критериев в следующей последовательности:**

1. Вычисляют статистику квантили распределения

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (2.8.3)$$

2. При выбранном уровне значимости  $q_1$  проверяется выполнение условий

$$d_{1-q_{1/2}} < d \leq d_{q_{1/2}}, \quad (2.8.4)$$

где:  $d_{1-q_{1/2}}$  и  $d_{q_{1/2}}$  - квантили, выбираемые из таблицы Б.5 приложения Б.

3. Для выбранного уровня значимости  $q_2$  второго критерия определяют значения  $m_0$  и  $P$  по таблице Б.6 приложения Б.

4. По формуле (2.7.11а) вычисляют  $F(t)$  и затем в таблице Б.2 находят соответствующее значение квантили интегральной функции нормированного нормального распределения  $t$ .

5. Проверяется условие

$$m \leq m_0, \quad (2.8.5)$$

где:  $m$  - число наблюдений, для которых

$$|x_i - \bar{x}| > t \cdot S_x. \quad (2.8.5 \text{ а})$$

Распределение результатов измерений считается отличным от нормального, если не выполняется хотя бы один из критериев, (2.8.4) и (2.8.5).

Уровень значимости составного критерия -  $q \leq (q_1 + q_2)$ .

**Если число  $n$  измерений меньше 11**, то нормальность распределения результатов наблюдений проверяется в следующей последовательности:

1. Результаты группируют в так называемый вариационный ряд:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots x_k,$$

где  $k$  - порядковый номер группы.

2. По формуле

$$F_n(x) = \sum_{i=1}^n m_i \cdot (n-1), \quad (2.8.6)$$

определяют статистическую функцию распределения  $F_n(x_k)$ ,

где  $m_i$  - частота повторений.

3. По таблице Б.2 находят значения  $t_k$ , соответствующие полученным значениям  $F_n(x_k)$  статистической функции распределения.

4. В координатах  $t, x$  наносят точки  $t_k, x_k$ . При нормальном распределении эти точки должны расположиться вдоль одной прямой линии.

### 2.8.2.3. Определение доверительной вероятности результатов измерений

Доверительную вероятность по определенным экспериментально (или заданным) значениям  $S_x$ ,  $\bar{X}$  и доверительного интервала  $[x_1; x_2]$  определяют следующим образом. По формулам

$$t_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{S_x}, \quad t_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{S_x}, \quad (2.8.7)$$

определяют нормированные отклонения  $t_1$  и  $t_2$  результатов измерений  $x_1$  и  $x_2$  от среднего арифметического  $\bar{x}$ , по значениям которых из таблицы Б.2 находят соответствующие значения интегральной функции  $F(t_1)$  и  $F(t_2)$ , по формуле

$$P = F(t_1) + F(t_2), \quad (2.8.8)$$

определяют доверительную вероятность  $P$ .

### 2.8.3. Совместная обработка нескольких рядов измерений

Как уже отмечалось в разделе 2.7.2., СКО результата измерений (или среднего арифметического)  $S_{\bar{x}}$  в  $\sqrt{n}$  раз меньше СКО единичного измерения (в ряду равнозначных измерений)  $S_x$ . Поэтому для уменьшения случайной

составляющей погрешности измерения проводят многократно. С этой же целью при обработке нескольких рядов измерений одной и той же величины для увеличения числа измерений эти группы объединяют в одну единую группу. Однако, перед объединением необходимо выяснить являются ли они равноточными (равнорассеянными) или же неравноточными. Гипотезу о равнорассеянности групп результатов измерений проверяют в два этапа:

Этап 1.

Проверяется гипотеза о равенстве дисперсий  $S_j^2$  во всех группах измерений. Для этого проверяют незначимость отношения

$$\frac{S_k^2}{S_m^2} < (F_{n_{k-1}, n_{m-1}})_q, \quad (2.8.9)$$

где:  $n_k$  и  $n_m$  - число измерений в  $k$ -й и  $m$ -й группах;  
 $(F_{n_{k-1}, n_{m-1}})_q$  - значение  $F$ -распределения Фишера с  $(n_k - 1)$  и  $(n_m - 1)$  степенями свободы при уровне значимости  $q$ , определяемое из таблицы Б.7.

Этап 2.

Проверяется гипотеза о равенстве математических ожиданий этих групп. Это осуществляется проверкой выполнения условия

$$\frac{S_I^2}{S_{II}^2} < (F_{k-1, N-1})_q, \quad (2.8.10)$$

или (при малых количествах групп)

$$t_{k-m} < t, \quad (2.8.11)$$

где  $t$  - определяется по таблице Б.1.

$$t_{k-m} = \frac{\bar{x}_k - \bar{x}_m}{\sqrt{(n_k - 1)S_k^2 + (n_m - 1) \cdot S_m^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_k \cdot n_m \cdot (n_k + n_m - 2)}{n_k + n_m}}, \quad (2.8.12)$$

$$S_I^2 = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{j=1}^k n_j \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})^2, \quad (2.8.13)$$

$$S_{II}^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad (2.8.14)$$

где:  $S_I^2$  - рассеивание между групповыми средними;

$S_{II}^2$  - среднее рассеивание внутри групп;

$t_{k-m}$  - величина, имеющая распределение Стьюдента с  $(n_k + n_m - 2)$  степенями свободы.

Если условия (2.8.9) и (2.8.10) или (2.8.11) выполняются, то эти ряды измерений считаются равноточными (равнорассеянными), в противном случае неравноточными (неравнорассеянными).

Равноточные ряды измерений обрабатывают в той же последовательности, что и в разделе 2.8.2. При этом число измерений  $n$  равно сумме чисел измерений  $n_1, n_2, \dots, n_m$  в рядах измерений, т. е.

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_m.$$

#### 2.8.4. Обработка неравнорассеянных рядов наблюдений

Если оценки дисперсии рядов измерений существенно отличаются друг от друга, а средние арифметические являются оценками одного и того же значения измеряемой величины, т. е. если ряды неравнорассеянные (неравноточные), то среднее арифметическое значение (эффективная оценка истинного значения) измеряемой величины определяется по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{\bar{x}_j}{S^2(x_j)}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{S^2(x_j)}} = \sum_{j=1}^m a_j \cdot \bar{x}_j, \quad (2.8.15)$$

$$\frac{K}{S_{\bar{x}_j}^2} = \frac{K \cdot n_j}{S_{x_j}^2} = P_j, \quad (2.8.16)$$

где:  $P_j$  - веса отдельных средних арифметических.

**СКО среднего взвешенного** должна равняться единице, деленной на математическое ожидание второй производной от логарифмической функции правдоподобия, или

$$S^2(\bar{x}_j) = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{S^2(x_j)}}. \quad (2.8.17)$$

## 2.8.5. Округление результатов измерений.

### Правило округления. Критерий ничтожных погрешностей.

**Округление результатов измерений.** Результат измерения следует округлять так, чтобы числовое значение результата измерений заканчивалось цифрой того же десятичного разряда, что и значение погрешности.

Округление числа заключается в отбрасывании одного или нескольких последних десятичных знаков, а в случае, если их нет, то в замене одной или нескольких последних цифр целой части числа нулями. Округление выполняют, пользуясь следующими правилами.

В случае если десятичная дробь в числовом значении результата измерения оканчивается нулями, то нули отбрасывают только до того разряда, который соответствует разряду погрешности.

*Например, результат измерения 23,45613234, при погрешности  $\pm 0,000004$  округляют до 23,45613.*

Если первая отбрасываемая или заменяемая нулями цифра меньше 5 (пяти), то остающиеся цифры не изменяются, а лишние цифры заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают.

*Например, число 172434 при сохранении четырех значащих цифр округляют до 172400; число 19,243 - до 19,24.*

Если первая отбрасываемая или заменяемая цифра больше 5 (пяти) или равна 5, но за ней следует еще отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу.

*Например,  $15,86 \approx 15,9$ ;  $8,253 \approx 8,3$ ;  $117,452 \approx 117,5$ .*

Если первая отбрасываемая или заменяемая цифра равна 5 (пяти) и за ней не следует отличных от нуля цифр, или идут нули, то последнюю оставшуюся цифру увеличивают на единицу, если она нечетная и оставляют без изменения, если она четная или ноль.

*Например,  $3,7025 \approx 3,702$ ;  $75,350 \approx 75,4$ .*

Такое правило называется *правилом округления до четного*.

Стандарт СТ СЭВ 542-77 устанавливает, что если первая отбрасываемая цифра (считая слева направо) равна 5 (пяти), то последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу. Например,  $0,345 \approx 0,35$ .

**Округление погрешности измерений.** Обычно погрешность результата измерений округляется, по крайней мере до двух, редко до трех значащих цифр. Под значащей цифрой числа понимают все его цифры, а также ноль, если только он не поставлен для определения разряда других цифр (например, нули в начале десятичных дробей - незначащие; нули в середине числа - значащие; нули в конце десятичного числа значащие; нули в конце целого числа могут быть значащими и незначащими). Чтобы различать значащие и незначащие нули в конце целого числа, используют способ записи чисел с вынесением незначащих нулей в сомножитель  $10^n$  ( $n$  - целое положительное или отрицательное число).

*Например,  $1900 = 1,9 \cdot 10^3$ ;  $37100 = 3,71 \cdot 10^4$ ;  $0,0003 = 3 \cdot 10^{-4}$ .*

**Критерий ничтожных погрешностей.** Погрешность  $E_k$  считается ничтожно малой, если

$$E_k < \frac{S(\bar{x}_Q)}{3} = 0,3 \cdot S(\bar{x}_Q), \quad (2.8.18)$$

где:  $E_k$  -  $k$ -я частная погрешность;

$S(\bar{x}_Q)$  - погрешность среднего арифметического или суммарная погрешность.

**Критерий ничтожности погрешностей** можно использовать и для погрешности косвенных измерений, т.е. для суммы квадратов частных погрешностей:

$$\sqrt{E_k^2 + S_{k+1}^2 + \dots} < \frac{S(\bar{x}_Q)}{3}, \quad (2.8.19)$$

где:  $E_k$  -  $k$ -я частная погрешность.

## 2.9. Выражение неопределенности результатов измерений

В конце шестидесятых годов XX века в среде специалистов, связанных с измерениями и интерпретацией их результатов, возникла новая концепция - *неопределенность измерений*.

Существовавшая до того времени, да и существующая еще и сегодня, система количественной оценки качества измерений базируется на понятии «истинное значение» измеряемой величины. Однако, поскольку истинное значение не достижимо, в метрологии в качестве исходного значения, принималось (и принимается на практике в настоящее время) «действительное значение» измеряемой величины (см. раздел 1.3.3.). Таким образом, при неизвестном истинном значении величины, в метрологии допускается утверждение, что отклонение от истинного (погрешность) равно некоторому вполне определенному числу, и при этом не важно, как было найдено это отклонение - теоретически или экспериментально. Насколько такое утверждение правильно - неизвестно!

В реальной деятельности в области промышленной метрологии, не связанной с эталонами, подобных вопросов не возникает. В этом случае под истинным (или действительным) значением принимается значение, полученное при помощи средств измерений, точность которых адекватна решаемой измерительной задаче.

Чем же тогда вызвано появление понятия «неопределенность»? Насколько необходимо это понятие и как

оно связано с теми положениями метрологии как науки, с которыми уже привыкли оперировать? Были, а их не могло и не быть, объективные причины, которые заставили задуматься над вопросом: «Что есть погрешность? Если это отклонение от истины, то, что есть истина?» Истинного значения измеряемой величины, как и истины в широком, философском, смысле знать не дано. Ни материалистическая, ни идеалистическая философии не позволяют себе утверждений о полном познании сути вещей, в том числе и «истинных значений» измеряемых величин.

Таким образом, используя понятие «погрешность измерения», обычно оперируют со значениями, включающими в себя не только отклонение от некоего значения величины, условно принимаемого за истинное (действительное), но и с рядом действительно *НЕИЗВЕСТНЫХ* значений величины, в пределах которых может находиться «истинное значение» измеряемой величины.

При представлении результата измерений необходимо дать количественную оценку его качества, с тем, чтобы тот, кому этот результат измерений предназначен, мог оценить его надежность. Без этого невозможно сличать друг с другом результаты измерений или сопоставлять их с нормами, указываемыми в нормативных документах. Поэтому необходимо наличие простой в применении, доступной пониманию и общепризнанной методики для характеристики качества результата измерения, т. е. для оценки и выражения его «неопределенности».

Понятие неопределенность, как некая количественная характеристика качества результата измерений относительно новое. Традиционными, давно используемыми в метрологии терминами являются «погрешность» и «анализ погрешности». В настоящее время общепризнанно, что даже после того, как все известные или предполагаемые составляющие погрешности оценены и в результат измерений внесены соответствующие поправки, все еще остается сомнение в том, насколько точно результат измерения представляет значение измеряемой величины.

Как уже отмечалось, в условиях глобализации рынка, все актуальнее становится задача создания единого метода оценки и выражения неопределенности, с тем, чтобы результаты измерений, проводимых в различных странах, можно было легко сопоставлять друг с другом. При этом метод должен был быть универсальным, т. е. применимым ко всем видам измерений и ко всем типам входящих данных, используемых в измерениях, а величина, непосредственно используемая для выражения неопределенности, должна быть внутренне согласующейся (должна непосредственно выводиться из компонентов, составляющих ее, а также быть независимой от того как эти компоненты группируются и от деления компонентов на подкомпоненты) и допускающей передачу (должна существовать возможность непосредственного использования неопределенности, оцененной для одного результата, как составляющей при оценке неопределенности другого измерения, в котором используется первый результат).

Во многих случаях - в промышленности, торговле, здравоохранении, обеспечении безопасности - необходимо представлять результат измерения с указанием интервала, в пределах которого, можно предполагать, находится большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны величине, подлежащей измерению.

Следовательно, метод оценки и выражения неопределенности измерения должен представлять возможность указать такой интервал, в частности, интервал, вероятность охвата или уровень доверия которого, реально соответствует требуемому.

Исходя из приведенных выше предпосылок, в 1978 году, признавая отсутствие международного единства по вопросу о выражении неопределенности измерений, наивысший мировой авторитет в области метрологии - Международный комитет мер и весов (МКМВ) обратился к Международному бюро мер и весов (МБМВ) с просьбой рассмотреть эту проблему.

В результате сложной, кропотливой работы, к которой были привлечены национальные метрологические институты 32 стран, авторитетными международными организациями МБМВ, ИСО, МЭК, МОЗМ, ИЮПАК, ИЮПАП и МФКХ (см. раздел

1.5) в 1993 году было разработано «Руководство по выражению неопределенности измерений» (далее - Руководство).

Для правильного понимания вопросов, связанных с оценкой и выражением неопределенности, рассмотрим ряд терминов, приведенных и используемых в Руководстве:

- **неопределенность измерения** - параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует рассеяние значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

*Примечания:*

1. *Параметром может быть, например, стандартное отклонение (или значение кратное ему) или полуширина интервала, имеющего установленный уровень доверия.*

2. *Неопределенность измерения обычно включает много составляющих, некоторые из этих составляющих могут быть оценены из статистического распределения результатов рядов измерений и могут являться экспериментальными стандартными отклонениями. Другие составляющие, которые тоже могут характеризоваться стандартными отклонениями, оценивают из предполагаемых распределений вероятностей, основанных на опыте или другой информации.*

3. *Очевидно, что результат измерения является наилучшей оценкой измеряемой величины и что все составляющие неопределенности, включая те, которые возникают от систематических эффектов, таких как составляющие, связанные с поправками и эталонами сравнения, вносят вклад в дисперсию.*

- **стандартная неопределенность** - неопределенность результата измерения, выраженная как стандартное отклонение;

- **оценка (неопределенности) по типу А** - метод оценивания неопределенности путем статистического анализа ряда наблюдений;

- **оценка (неопределенности) по типу В** - метод оценивания неопределенности иным способом, чем статистический анализ рядов наблюдений;

- **суммарная стандартная неопределенность** - стандартная неопределенность результата измерений, когда результат получают из значений ряда других величин, равная

положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерения изменяется в зависимости от изменения этих величин;

- **расширенная неопределенность** - величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого, можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли быть приписаны измеряемой величине.

*Примечания:*

1. Эта часть распределения может рассматриваться как вероятность охвата или уровень доверия для интервала.

2. Установление связи между конкретным уровнем доверия и интервалом, определенным расширенной неопределенностью, требует явных и неявных предположений относительно распределения вероятностей, характеризуемого результатом измерения и его суммарной стандартной неопределенностью. Уровень доверия, который может быть приписан этому интервалу, может быть известен только до той степени, в которой такие предположения могут быть оправданы;

- **коэффициент охвата** - числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения стандартной неопределенности.

*Примечание – Коэффициент охвата  $k$  обычно находится в диапазоне от 2 до 3.*

Неопределенность результата измерения отражает отсутствие точного знания значения измеряемой величины. Результат измерения после внесения поправки на известные систематические эффекты продолжает оставаться только оценкой значения измеряемой величины вследствие неопределенности, возникающей из-за случайных эффектов и неточной поправки результата на систематические эффекты.

Существуют различные источники неопределенности измерений, в том числе такие как:

- неполное определение измеряемой величины;

- несовершенную реализацию определения измеряемой величины;
- нерепрезентативную выборку - измеренный образец может не представлять определяемую измеряемую величину;
- неадекватное знание эффектов от условий окружающей среды, влияющих на измерение, или несовершенное измерение условий окружающей среды;
- субъективная систематическая погрешность оператора при снятии показаний аналоговых средств измерений;
- конечная разрешающая способность средств измерений или порог чувствительности;
- неточные значения, приписанные эталонам, используемым для измерения, и стандартным образцам веществ и материалов;
- неточные значения констант и других параметров, полученных из внешних источников и используемых в алгоритме обработки данных;
- аппроксимации и предположения, используемые в методе измерения и методике выполнения измерений;
- измерения в повторных наблюдениях измеряемой величины при явно одинаковых условиях.

Неизвестный систематический эффект не может быть учтен в оценке неопределенности результата измерения, но он вносит вклад в его погрешность.

Составляющие неопределенности группируют в две категории в соответствии с методами их оценки «А» и «В». Эти категории относятся к неопределенности и не являются заменителями слов «случайная» и «систематическая».

Оцененную дисперсию  $u^2$ , характеризующую составляющую неопределенности, полученную в результате оценивания по типу А, вычисляют из рядов повторных наблюдений, и она является знакомой статистической оценкой дисперсии  $s^2$ .

Оцененное стандартное отклонение  $u$ , представляющее собой положительный квадратный корень из  $u^2$  является, таким образом, стандартным отклонением  $s$ , и его, для удобства, иногда называют *стандартной неопределенностью типа А*.

Для составляющей неопределенности, полученной из оценивания по типу  $B$ , оцениваемую дисперсию  $u^2$  вычисляют, используя имеющиеся данные и оцененное стандартное отклонение  $u$ , и иногда называют *стандартной неопределенностью типа  $B$* .

Таким образом, стандартную неопределенность типа  $A$  получают из функции плотности вероятностей, полученной из наблюдаемого распределения по частоте, в то время как стандартную неопределенность типа  $B$  получают из предполагаемой функции плотности вероятностей, основанной на степени уверенности в том, что событие произойдет (эту вероятность часто называют *субъективной вероятностью*).

*Примечание - Оценка составляющей неопределенности типа  $B$  как правило основывается на фонде сравнительно надежной информации.*

Стандартная неопределенность результата измерения, когда результат получают из значений ряда других величин, называется суммарной стандартной неопределенностью и обозначается как  $u_c$ . Она является оцененным стандартным отклонением, связанным с результатом, и равна положительному квадратному корню из суммарной дисперсии, полученной из всех составляющих дисперсии и ковариации.

Для удовлетворения требований в некоторых областях промышленности и торговли, а также требований в области здравоохранения и безопасности применяют расширенную неопределенность  $U$ , полученную умножением суммарной стандартной неопределенности  $u_c$  на коэффициент охвата  $k$ . Величина  $U$  показывает интервал около результата измерения, в пределах которого, можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые могли быть с достаточным основанием приписаны измеряемой величине.

*Примечание - Коэффициент охвата всегда должен быть указан, чтобы можно было, в случае необходимости, снова получить стандартную неопределенность.*

Если все величины, от которых зависит результат измерения, изменяются, их неопределенность можно оценить статистическими средствами. Однако так как на практике это редко представляется возможным из-за ограниченного времени

и ресурсов, неопределенность результата измерения обычно оценивают, используя математическую модель измерения и закон распределения неопределенности.

Поскольку математическая модель может быть неполной, все упомянутые величины следует изменять до самой полной практической степени, чтобы оценивание неопределенности, насколько это, возможно, могло быть основано на наблюдаемых данных. Математическая модель должна всякий раз пересматриваться, когда наблюдаемые данные, включая результаты независимых определений той же самой величины, показывают, что модель неполна. Хорошо спланированный эксперимент может значительно способствовать повышению надежности оценок неопределенности и является частью искусства проведения измерений.

Для того чтобы решить, нормально ли функционирует измерительная система, экспериментально наблюдаемая изменчивость ее выходных величин, оцененная их наблюдаемыми стандартными отклонениями, можно сравнить его с предсказанным стандартным отклонением, полученным суммированием различных составляющих неопределенности, которые характеризуют измерение. В таких случаях следует рассматривать только те составляющие, которые могут внести вклад в экспериментально наблюдаемую изменчивость выходных величин.

В некоторых случаях нет необходимости включать неопределенность поправки на систематический эффект в оценивание неопределенности результата измерения. Хотя неопределенность уже оценена, ею можно пренебречь, если ее вклад в суммарную стандартную неопределенность результата измерения незначителен. Если значение самой поправки незначительно по сравнению с суммарной стандартной неопределенностью, то ею самой тоже можно пренебречь.

На практике, особенно в области законодательной метрологии, часто средство измерений проверяется сравнением с эталоном и неопределенности, связанные с эталоном и процедурой сравнения, пренебрежимо малы по сравнению с требуемой точностью поверки. В таких случаях, поскольку составляющие неопределенности достаточно малы, чтобы ими

можно было пренебречь, измерение может рассматриваться как определение погрешности поверяемого устройства.

Оценка значения измеряемой величины, полученная в результате измерения, иногда выражается в единицах, принятых для эталона, а не в единицах Международной системы единиц СИ. В таких случаях значение неопределенности, приписываемое результату измерения, может быть значительно меньше, чем когда результат выражается в соответствующих единицах СИ.

Грубые ошибки при регистрации или анализе данных могут вносить значительную неизвестную погрешность в результат измерения. Большие грубые ошибки обычно можно распознать путем должной проверки данных, незначительные ошибки могут быть замаскированы или даже проявляться как случайные изменения. Характеристики неопределенности не предназначены для выявления, оценок и объяснения таких ошибок.

Оценка неопределенности не является ни рутинной, ни чисто математической работой, она зависит от детального знания природы измеряемой величины и измерения. Качество и ценность оценки неопределенности результата измерения, в конечном счете, зависит от критичности мышления, интеллектуальной честности и профессионального мастерства тех, кто участвует в приписывании ее значения.

При движении вверх по иерархии измерений требуется все больше подробностей о том, как были получены результат измерения и его неопределенность. Тем не менее, на любых уровнях иерархии метрологической деятельности, определяемых, например, как:

- коммерческая и регулирующая деятельность на рынке;
- инженерные работы в промышленности;
- калибровочные услуги более низкого уровня;
- промышленные исследования и разработки;
- академические исследования, работы с промышленными эталонами;
- деятельность калибровочных лабораторий;
- деятельность национальных лабораторий эталонов и МБМВ;

вся информация, необходимая для повторного оценивания измерения, должна быть доступна для тех, кто в ней нуждается.

Глубинная разница заключается в том, что на более низких уровнях иерархической цепи большая часть необходимой информации может быть сделана доступной в форме опубликованных отчетов о калибровке и испытаниях, спецификаций по испытаниям, сертификатов о калибровке и испытаниях, руководств по эксплуатации, международных и национальных стандартов и локальных регулирующих актов и иных документов.

Огромное число измерений проводится каждый день практически во всех отраслях народного хозяйства без каких либо развернутых отчетов о неопределенности. Однако многие из измерений проводятся с помощью средств измерений, подлежащих периодической калибровке или узаконенной поверке. Если известно, что используемые средства измерений находятся в соответствии с их спецификациями или с существующими нормативными документами, которые на них распространяются, то неопределенности их показаний могут быть извлечены из этих документов.

Хотя на практике количество информации, необходимое для того, чтобы оформить результат измерения в виде некоторого документа, зависит от предполагаемого использования этого результата, основной принцип назначения требований к подобным документам заключается в следующем: при составлении отчета о результате измерения и его неопределенности лучше дать избыток информации, чем ее недостаток.

Этапы, которым нужно следовать при оценивании и выражении неопределенности результата измерения, можно свести к следующим:

1. Выражают математически зависимость между измеряемой величиной  $Y$  и входными величинами  $X_i$ , от которых она зависит:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Функция  $f(X_i)$  должна содержать каждую величину, включая все поправки и поправочные множители, которая может внести значительную составляющую в неопределенность результата измерения.

2. Определяют  $x_i$  - оцененное значение входной величины  $X_i$ , либо на основе статистического анализ рядов наблюдений или другими средствами.

3. Оценивают стандартную неопределенность  $u(x_i)$  каждой входной оценки  $x_i$ .

Для входной оценки, полученной из статистического анализа рядов наблюдений, стандартная неопределенность оценивается по типу  $A$ .

Для входной оценки, полученной другими средствами, стандартная неопределенность оценивается по типу  $B$ .

4. Если значения каких-либо входных величин коррелированы, оценивают их ковариацию.

5. Рассчитывают результат измерения, т.е. оценку  $y$  измеряемой величины  $Y$  из функциональной зависимости  $f(X_i)$ , используя для входных величин  $X_i$  оценки  $x_i$ , полученные на этапе 2.

6. Определяют суммарную стандартную неопределенность  $u_c(y)$  результата измерения  $y$  из стандартных неопределенностей и ковариаций, связанных с входными оценками. Если процедура измерения позволяет определять одновременно более одной входной величины, рассчитывают их ковариацию.

7. Если требуется дать расширенную неопределенность  $U$ , чьей целью является обеспечение интервала от  $(y - U)$  до  $(y + U)$ , в пределах которого, предположительно, находится большая часть распределения значений, которые можно с достаточным основанием приписать измеряемой величине  $Y$ , умножают суммарную стандартную неопределенность  $u_c(y)$  на коэффициент охвата  $k$ , обычно находящийся в диапазоне от 2 до 3, чтобы получить

$$U = k \cdot u_c(y).$$

Коэффициент  $k$  выбирают исходя из желаемого уровня доверия требуемого для интервала.

8. Оформляют результат измерения  $y$  вместе с его суммарной неопределенностью  $u_c(y)$  или расширенной неопределенностью  $U$ . Описывают, каким образом получены  $y$  и  $u_c(y)$  или  $U$ .

## Глава 3

# СРЕДСТВА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

### 3.1. Средства измерений

Измерения проводят с помощью **средств измерений** - технических средств, используемых при измерениях и имеющих нормированные метрологические характеристики.

От свойств средств измерений и правильности их выбора во многом зависит правильность определения значения измеряемой величины в процессе измерения.

По функциональному назначению средства измерений делят на *меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы.*

#### 3.1.1. Меры

Под **мерой** понимают средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Меры, в свою очередь, делят на *однозначные, многозначные и наборы мер.*

**Однозначные** меры воспроизводят величины одного размера.

*Пример - гиря, концевая мера длины, катушка электрического сопротивления.*

**Многозначные** меры воспроизводят ряд одноименных величин разного размера. Наглядным примером таких мер является линейка с миллиметровыми делениями. Многозначными мерами являются также магазины электрического сопротивления.

В настоящее время получили распространение так называемые *кодоуправляемые* многозначные меры, широко используемые в автоматических измерительных системах. Требуемое значение величины, воспроизводимой такой мерой, можно получить как при ручном управлении, так и подачей на

управляющий вход специального сигнала (кода), формируемого, обычно, микропроцессором.

Примерами подобных мер являются автоматические задатчики давления, калибраторы напряжения, тока, частоты и другие.

**Набором** мер называют специально подобранный комплект однозначных мер, применяемых как по отдельности, так и в различных сочетаниях между собой с целью воспроизведения ряда одноименных величин разного размера. Номинальные значения отдельных однозначных мер в наборе устанавливают по определенному правилу.

Примером набора мер является набор гирь. Номинальные значения массы отдельных гирь в наборе устанавливают из ряда  $(1, 2, 2, 5) \cdot 10^n$  кг ( $n$  - целое положительное или отрицательное число). Это дает возможность, используя всего четыре гири, получить при их различных сочетаниях весь ряд целых значений массы от 1 до 10. Другим примером набора мер может служить набор измерительных конденсаторов постоянной емкости. В таком наборе номинальные значения электрической емкости отдельных конденсаторов набора устанавливают из ряда  $(1, 2, 3, 4) \cdot 10^n$  F ( $n$  - целое отрицательное число).

Наборами мер являются также наборы концевых мер длины, наборы светофильтров и ряд других.

К мерам относятся также специфические средства измерений - *стандартные образцы состава и (или) свойств веществ и материалов.*

**Стандартный образец** - средство измерений в виде образца вещества или материала с установленными значениями одной или нескольких величин, характеризующих его состав или свойство.

### 3.1.2. Измерительные преобразователи

**Измерительный преобразователь** - средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для дальнейшего преобразования, передачи, обработки и (или) хранения, но неподдающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительные преобразователи можно классифицировать по различным признакам.

Так, по характеру преобразования измерительные преобразователи делят на *преобразователи рода величин* и *масштабные преобразователи*.

В **преобразователях рода величин** входная и выходная величины разнородные. Например, термоэлектрический преобразователь температуры (термопара). Входной величиной такого преобразователя является температура, а выходной – э. д. с. постоянного тока.

**Масштабные преобразователи** применяются для изменения размера величины в заданное число раз. Например, измерительный трансформатор напряжения. Входная и выходная величины трансформатора однородные, но имеют разные размеры.

По месту, занимаемому преобразователем в измерительной цепи, измерительные преобразователи подразделяют на *первичные* и *промежуточные*.

Наглядным примером **первичного** преобразователя является термоэлектрический преобразователь температуры. Но выходной сигнал такого преобразователя технически сложно передать на значительное расстояние. Поэтому часто выходной сигнал термоэлектрического преобразователя подают на **промежуточный** измерительный преобразователь, преобразующий этот сигнал в частоту электрических колебаний. Измерительную информацию, представленную в такой форме, уже можно передать практически на любые расстояния и технически просто ввести для обработки в электронное вычислительное (и, при необходимости, управляющее) устройство. В данном случае преобразователь э. д. с. постоянного тока в частоту электрических колебаний можно назвать также **передающим измерительным преобразователем** - преобразователем, предназначенным для дистанционной передачи сигнала измерительной информации.

В системах телемеханики и телеизмерений (управление и измерения на расстоянии) широко используются **нормирующие измерительные преобразователи**, осуществляющие преобразование различных электрических (напряжение, частота,

мощность) и неэлектрических (давление, температура, уровень) величин в *унифицированный электрический сигнал* (обычно сигнал постоянного тока). Например, преобразователь давления типа «Сапфир».

В измерительной технике и в автоматике часто используют термин «*датчик*», а, в последнее время, и термин «*сенсор*», являющиеся синонимом понятия «*первичный измерительный преобразователь*». В метрологической практике эти термины применять не рекомендуется. Измерительный преобразователь это самостоятельное техническое средство, обладающее законченной конструкцией и имеющее нормированные метрологические характеристики (т. е. средство измерений). В то время как, например, сенсор, это чувствительный элемент другой, более сложной измерительной цепи или цепи автоматического управления.

Примечание – Сенсор может являться одним из структурных элементов измерительного преобразователя.

В любом измерительном процессе одним из основных элементов является оператор - наблюдатель. Поскольку сигнал измерительной информации на выходе измерительного преобразователя недоступен для непосредственного восприятия наблюдателем, этот вид средств измерений не имеет самостоятельного применения. Измерительные преобразователи используются только совместно с измерительными приборами или в составе измерительных установок или систем.

### 3.1.3. Измерительные приборы

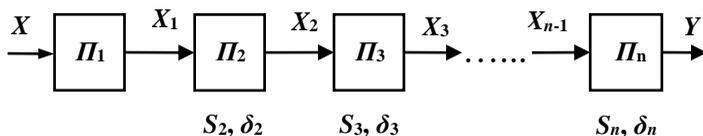
**Измерительный прибор** - средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительные приборы также можно классифицировать по ряду признаков.

По виду *структурной схемы* (схемы, описывающей последовательность преобразования сигнала измерительной информации в средстве измерений) измерительные приборы делят на *приборы прямого действия* и *приборы сравнения*.

**Прибор прямого действия** - измерительный прибор, в котором сигнал измерительной информации проходит ряд последовательных преобразований в одном направлении. Структурная схема такого прибора *разомкнутая* (рис. 3.1.).

*Пример* - Пружинные весы, электромеханический вольтметр, пружинный манометр, стеклянный ртутный термометр.



$X$  и  $Y$  - входная и выходная величины измерительного прибора;

$\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$  - отдельные преобразователи измерительной информации;

Рис. 3.1. Структурная схема измерительного прибора прямого действия

Для прибора по структурной схеме рис. 3.1. можно записать:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n,$$

$$S_{\Sigma} = S_1 S_2 \dots S_n,$$

где:  $\delta_{\Sigma}, S_{\Sigma}$  - погрешность и чувствительность всего прибора;

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  - погрешности преобразователей  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ ;

$S_1, S_2, \dots, S_n$  - чувствительности преобразователей  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ .

Приборы прямого действия характеризуются быстроедействием (например, электронный осциллограф), высокой чувствительностью, простотой использования, но имеют ограниченную точность.

**Прибор сравнения** - измерительный прибор, в котором производится (автоматически или с участием оператора) непосредственное сравнение измеряемой величины с величиной, значение которой известно. В таких приборах выходная величина  $Y$  с помощью специального преобразователя

обратной связи ( $\Pi_{обр}$ ) преобразуется в величину  $X_k$ , однородную с входной величиной  $X$ , которая подается на вход прибора в противофазе с входной величиной (величины  $X$  и  $X_k$  вычитаются на входе прибора). Структурная схема измерительных приборов сравнения *замкнутая* (рис. 3.2.).

Описанная обратная связь называется отрицательной и повышает стабильности характеристик прибора.

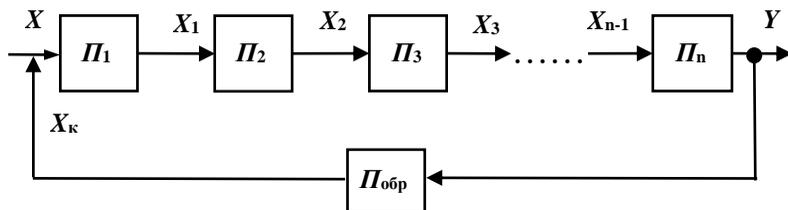


Рис. 3.2. Структурная схема измерительного прибора сравнения

Для прибора по структурной схеме рис. 3.2. можно записать:

$$S_{\Sigma} = \frac{S_{np}}{1 + S_{np} \cdot S_{обр}} \quad \text{или} \quad S_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{S_{np}} + S_{обр}},$$

где:  $S_{np}$  и  $S_{i\ddot{a}d}$  - чувствительности (коэффициенты преобразования) цепей прямого и обратного преобразования соответственно.

При  $S_{np} \gg 1$ , можно считать, что  $\frac{1}{S_{np}} \approx 0$ . Тогда,  $S_{\Sigma} \cong \frac{1}{S_{обр}}$ .

Таким образом, параметры прибора сравнения и, соответственно, его общая погрешность определяется преимущественно параметрами и погрешностью цепи обратного преобразования.

Наличие отрицательной обратной связи способствует высокой точности прибора, но часто в ущерб его быстродействию и общей чувствительности.

Примерами приборов сравнения являются равноплечие весы, потенциометр постоянного тока, грузопоршневой манометр, мост постоянного тока, применяемый для измерения электрических сопротивлений.

В ряде случаев сравнению подвергаются не сами измеряемая и известная величины, а эффекты, производимые этими величинами. Например, в равноплечих весах сравниваются не массы измеряемого объекта и гирь, а вращающие моменты, создаваемые этими телами, а в мостах постоянного тока сравниваются электрические токи, протекающие по цепям измеряемого и известного сопротивлений.

По взаимосвязи между показаниями прибора (выходная величина) и измеряемой величиной измерительные приборы делят на *приборы аналоговые* и *приборы цифровые*.

**Аналоговый прибор** - измерительный прибор, показания которого являются *непрерывной функцией* измеряемой величины.

Аналоговые приборы имеют высокое быстродействие, кроме того, изменения измеряемой величины по показаниям аналогового прибора психологически проще воспринимаются человеком в качественном отношении, чем по показаниям цифрового прибора. Однако точность аналоговых приборов (в основном, стрелочных) существенно ограничивается погрешностью отсчета (обычно не менее 0,05 - 0,1 %), обусловленной, в свою очередь, практически целесообразной длиной шкалы прибора.

**Цифровой прибор** - измерительный прибор, автоматически вырабатывающий *дискретные* сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

Сигнал измерительной информации с выхода цифрового прибора технически просто вводится для обработки в электронное вычислительное устройство, такие приборы не имеют ограничений по погрешности отсчета, кроме того, они лишены субъективной погрешности отсчета, присущей всем стрелочным приборам. Однако цифровые приборы имеют, характерную только для них, погрешность дискретности.

Указанная погрешность может быть достаточно большой у цифровых приборов высокого быстродействия.

По форме представления измерительной информации измерительные приборы делят на *показывающие* и *регистрирующие*.

**Показывающий прибор** - измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний, в отличие от **регистрирующего прибора**, в котором предусмотрена и (или) регистрация показаний.

Регистрация показаний может выполняться как в аналоговой (например, на диаграммном диске), так и в цифровой форме (на бумажном или магнитном носителе).

Измерительные приборы можно разделить также на *приборы текущего значения* и *интегрирующие приборы*.

Показания **прибора текущего значения** отражают значение измеряемой величины на момент времени измерения (манометр, амперметр).

**Интегрирующий прибор** - измерительный прибор, в котором подводимая величина подвергается интегрированию по времени или по другой независимой переменной (счетчик электрической энергии, водосчетчик, планиметр).

По характеру установки на месте применения измерительные приборы разделяют на *стационарные*, предназначенные для жесткого крепления, и *переносные* - не предназначенные для жесткого крепления.

### **3.1.4. Измерительные установки и измерительные системы**

Измерительные установки и системы являются более функционально и структурно сложными видами средств измерений.

**Измерительная установка** – совокупность, функционально и конструктивно объединенных и расположенных в одном месте средств измерений (мер, измерительных преобразователей и приборов) и вспомогательных устройств, предназначенная для измерения одной или нескольких величин и выработки сигналов

измерительной информации в форме удобной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Примером измерительных установок являются измерительные комплексы для измерения расхода и количества жидкостей и газов, установки для градуировки и поверки электроизмерительных приборов.

**Измерительная система** – совокупность, функционально объединенных и соединенных каналами связи средств измерений (мер, измерительных преобразователей и приборов), вспомогательных устройств и средств вычислительной техники, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

Измерительные системы используются для контроля разнообразных параметров крупных объектов, например, теплоэлектростанции. Измерительная система может содержать сотни измерительных каналов, а расстояние между отдельными элементами системы может составлять сотни и более километров. Причем связь между элементами системы может осуществляться как по обычным, проводным, так и по беспроводным каналам.

Основной целью применения измерительных систем является автоматизация процесса измерения и использования результатов измерения для автоматического управления различными производственными процессами.

Измерительные установки и системы принято рассматривать как отдельные виды средств измерений, не смотря на то, что в их состав входит значительное число различных средств измерений. Это объясняется тем, что метрологические характеристики измерительных установок и систем обусловлены не только параметрами входящих в них средств измерений, но и параметрами вспомогательных устройств, каналов связи, взаимодействием между собой средств измерений и вспомогательных устройств.

### **3.2. Метрологические характеристики средств измерений**

### 3.2.1. Основные понятия. Информативный параметр входных и выходных сигналов средств измерений

Средства измерений, как и другие технические устройства, имеют ряд технических характеристик, определяющих назначение и применение этих средств. В составе технических характеристик по ГОСТ 8.009-84 выделяют характеристики свойств

средств измерений, оказывающих влияние на результаты и погрешности измерений, предназначенные для оценки технического уровня и качества средств измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений. Такие характеристики средств измерений называют *метрологическими характеристиками*.

При анализе свойств средств измерений очень важно отличать входной сигнал средства измерений от самой измеряемой (входной) величины. Например, входным сигналом и вольтметра переменного тока и частотомера является электрический сигнал напряжения переменного тока, характеризуемый десятком различных параметров (мгновенное значение, действующее значение, частота, форма кривой и др.). В то же время измеряемой величиной, например, электромагнитного вольтметра является действующее (среднее квадратическое) значение напряжения, а измеряемой величиной частотомера частота этого сигнала напряжения.

Поэтому в метрологии используются такие понятия, как *информативный параметр* входного или выходного сигнала средства измерений и, соответственно - *неинформативный параметр* этих сигналов. Под этими терминами понимают следующее:

**информативный параметр входного сигнала средства измерений** - параметр входного сигнала, функционально связанный с измеряемой величиной или являющийся самой измеряемой величиной;

**информативный параметр выходного сигнала средства измерений** - параметр выходного сигнала, функционально связанный с информативным параметром входного сигнала или являющейся выходной величиной меры.

Соответственно **неинформативными параметрами входного (выходного) сигнала** средства измерений называются параметры этих сигналов не связанные функционально с измеряемой величиной.

Например, для прибора, измеряющего объемный расход жидкости, информативным параметром входного сигнала является скорость потока жидкости, а неинформативным параметром - температура этой жидкости.

В зависимости от режима работы средств измерений их характеристики разделяют на *статические* и *динамические*.

При этом **статическими характеристиками** называются параметры средств измерений в *статическом режиме работы*, т.е. когда входная величина не меняется за время измерения.

**Динамическими характеристиками** называются параметры средств измерений, отражающие их свойства в *динамическом режиме*, т.е. когда входная величина средства измерений изменяется в процессе измерения.

Примечание - Под входной и выходной величинами средств измерений для удобства обозначим информативные параметры соответственно входного и выходного сигналов этих средств.

### **3.2.2. Основные статические характеристики средств измерений**

К основным **статическим характеристиками** средств измерений относятся *функция преобразования*, *чувствительность*, *порог чувствительности*.

**Функция преобразования** - функциональная зависимость между значениями величин на входе ( $X$ ) и выходе ( $Y$ ) средства измерений.

Функция преобразования может быть задана аналитически [уравнение преобразования -  $Y = f(X)$ ], графически или таблично.

Функцию преобразования часто называют *градуировочной характеристикой* средства измерений.

Функцию преобразования, приписанную средству измерения (или конкретному типу средства измерений) называют *номинальной функцией преобразования* средства измерений -  $Y = f_n(X)$ .

Идеальным видом номинальной функции преобразования измерительных преобразователей и приборов является линейная зависимость -  $Y = k_n(X)$ .

Например, измерительные приборы с линейной номинальной функцией преобразования имеют *равномерные шкалы* - шкалы, в которых расстояние между двумя соседними отметками (*деление шкалы*) одинаково по всей шкале. Равномерные шкалы технологичнее в изготовлении, а приборы с такими шкалами удобнее в эксплуатации.

**Чувствительность** - отношение изменения выходной величины средства измерений к вызвавшему его изменению входной величины. В общем случае чувствительность

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} .$$

Размерность чувствительности определяется размерностями входной и выходной величин.

Для наглядности, чувствительность для заданного значения входной величины ( $x$ ) можно графически представить как тангенс угла наклона касательной в данной точке графика функции преобразования.

При нелинейной функции преобразования чувствительность зависит от  $X$ , а при линейной функции чувствительность постоянна по диапазону измерений. У измерительных приборов с равномерными шкалами чувствительность во всех точках шкалы одна и та же.

В ряде случаев используют такую характеристику, как «*относительная чувствительность*», определяемую в виде отношения изменения выходной величины к вызвавшему его относительному изменению входной величины –

$$S_{om} = \frac{\Delta Y}{\Delta X / X}.$$

Другой важной характеристикой измерительного преобразователя или прибора является *постоянная* - величина обратная чувствительности средства измерений -  $C = 1/S$ .

Для стрелочных приборов термин «постоянная» соответствует понятию *цена деления*, т.е. разности значений измеряемой величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Чувствительность не следует смешивать с *порогом чувствительности*, под которым понимают минимальное изменение входной величины, обнаруживаемое с помощью данного средства измерений. Порог чувствительности выражают в единицах входной величины. Следует отметить, что понятие «чувствительность» неприемлемо к интегрирующим приборам, в то время как понятие «порог чувствительности» приемлемо к любым измерительным преобразователям и приборам.

Одним из важных процессов, оказывающих влияние на результат и погрешность измерений, является обмен энергии между объектами измерения и соединенными с ними средствами измерений, а также между средствами, соединенными между собой в измерительной цепи. Потребление энергии средством измерений от объекта измерений или от другого, предварительно включенного средства измерения, приводит к изменению величины, подлежащей измерению и, следовательно, к искажению результата измерения.

*Пример:*

*При присоединении к объекту измерения термоэлектрического измерительного преобразователя температуры может измениться температура объекта, вследствие обмена энергией между объектом измерения и измерительным преобразователем. Поскольку обмен энергией процесс двухсторонний, температура объекта измерения может как повыситься, так и понизиться. С другой стороны, при подключении к указанному измерительному*

*преобразователю пирометрического милливольтметра для измерения выходной величины преобразователя (электродвижущей силы постоянного тока), эта величина также может измениться за счет обмена энергией между преобразователем и милливольтметром, вследствие конечного значения входного электрического сопротивления милливольтметра.*

Для оценки взаимодействия средства измерений с любым, из подключенных к его входу или выходу компонентов (объект измерения, средство измерений и т. п.), когда такое взаимодействие может влиять на инструментальную составляющую погрешности измерения, используют такие характеристики как *входной* или *выходной импеданс* (полное сопротивление) средства измерений. В метрологической практике указанные понятия определяются следующим образом:

**входной (выходной) импеданс средства измерений** – отношение обобщенной силы, действующей на входе (выходе) средства измерений, к обобщенной скорости, характеризующей процессы во входной (выходной) цепи этого средства измерений.

Приведенное определение термина «импеданс» позволяет использовать его для любых физических систем (механических, гидравлических, магнитных, электрических и пр.)

*Пример:*

*В электрической цепи обобщенной силой является электрическое напряжение, а обобщенной скоростью – электрический ток. Отношение указанных величин представляет собой, по закону Ома, электрическое сопротивление.*

Важнейшей метрологической характеристикой средства измерений является *диапазон измерений* - область значений входной величины, для которой нормированы допускаемые значения погрешности.

Начальное и конечное значения диапазона измерений называют *нижним* и *верхним* пределами измерений средства измерений. Необходимо отметить, что диапазон измерений не всегда соответствует диапазону значений входной величины,

при которых сохраняется физическое функционирование средства измерений.

Например, диапазон измерений стационарных измерительных трансформаторов напряжения от  $0,8 \cdot U_{1н}$  до  $1,2 \cdot U_{1н}$  ( $U_{1н}$  - номинальное напряжение на входе трансформатора), т. к. для напряжений менее  $0,8 \cdot U_{1н}$  и свыше  $1,2 \cdot U_{1н}$  погрешности трансформаторов не нормируются.

Для некоторых измерительных приборов с начальной и конечной отметками шкалы соответственно «0» и « $A_n$ » диапазон измерений может быть уже этого интервала, так как по ряду причин погрешность для начального участка шкалы не нормируется. Для таких средств измерений, интервал значений шкалы прибора, ограниченный отметками «0» и « $A_n$ », называют *диапазоном показаний* средства измерений.

### 3.2.3. Динамические характеристики средств измерений

**Динамические метрологические характеристики** средств измерений отражают инерционные свойства средства измерений и определяют зависимость выходного сигнала средства измерений от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, внешних влияющих величин и пр. В зависимости от полноты описания динамических свойств средств измерений различают *полные* и *частные динамические характеристики*.

**Полная динамическая характеристика** - характеристика, однозначно определяющая изменения выходного сигнала средства измерений при любом изменении во времени информативного или неинформативного параметров входного сигнала, влияющей величины, нагрузки.

К полным динамическим характеристикам относят *переходную характеристику*, *импульсную переходную характеристику*, *амплитудно-фазовую характеристику*, совокупность *амплитудно-частотной* и *фазо-частотной характеристик*, *передаточную функцию*.

**Частная динамическая характеристика** не отражает полностью динамические свойства средства измерений. К частным динамическим характеристикам аналоговых средств измерений относят любые функционалы или параметры полных динамических характеристик. Примерами таких характеристик являются: *время реакции средства измерений (время установления показаний прибора) коэффициент демпфирования, значение собственной резонансной частоты, значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте.*

### 3.2.4. Погрешности средств измерений

Важнейшей характеристикой средства измерений является погрешность, которую оно вносит в результат измерений (инструментальная составляющая погрешности измерения), или, как принято говорить, *погрешность средства измерений.*

Погрешности средств измерений принято рассматривать в различных аспектах.

По форме числового выражения различают *абсолютную и относительную погрешности* средств измерений.

**Абсолютная погрешность** средства измерений ( $\Delta x$ ) в общем случае определяется как разность между результатом измерения ( $A_x$ ), установленным с помощью данного средства измерений, и истинным ( $X_n$ ) (на практике действительным -  $X_0$ ), значением измеряемой величины –

$$\Delta x = A_x - X_n \text{ или } \Delta x = A_x - X_0.$$

При этом абсолютная погрешность на практике рассчитывается:

- для мер -  $\Delta y = Y_n - Y_0$ ;

- для измерительных приборов -  $\Delta x = A_n - X_0$ ;

где:  $Y_n$  - номинальное значение величины, воспроизводимой мерой;

$Y_0$  - действительное значение величины, воспроизводимой мерой;

$A_n$  - показание измерительного прибора;

$X_0$  - действительное значение входной величины измерительного прибора, соответствующее данному показанию.

Абсолютная погрешность измерительных преобразователей может быть выражена как в единицах входной величины ( $\Delta x$ ) (по входу), так и в единицах выходной величины ( $\Delta y$ ) (по выходу). При этом:

$$\Delta x = \varphi_n(Y_0) - X_0; \quad \Delta y = Y_0 - f_n(X_0);$$

где:  $f_n$  - номинальная функция преобразования измерительного преобразователя;

$\varphi_n$  - функция, обратная номинальной функции преобразования ( $f_n$ );

$X_0$  и  $Y_0$  - действительные значения величин на входе и на выходе измерительного преобразователя соответственно.

Если номинальная функция преобразования измерительного преобразователя линейная, то абсолютную погрешность преобразователя по входу или выходу можно определить в следующем виде:

$$\Delta x = C_n \cdot Y_0 - X_0; \quad \Delta y = Y_0 - S_n \cdot X_0;$$

где:  $C_n$  и  $S_n$  - номинальные значения постоянной и чувствительности измерительного преобразователя соответственно.

Относительная погрешность средства измерений ( $\delta_x$ ) в общем случае определяется как отношение абсолютной погрешности ( $\Delta x$ ) к истинному (действительному) значению величины –

$$\delta_x = \Delta x / X_n \text{ или } \delta_x = \Delta x / X_0.$$

Относительную погрешность средств измерений обычно выражают в процентах (%). Применяется также выражение относительной погрешности безразмерной величиной, в промилле (‰), в частях на миллион (ppm), в частях на миллиард (ppb).

Относительная погрешность измерительного преобразователя также может быть рассчитана по входу ( $\delta_x$ ) или по выходу ( $\delta_y$ ):

$$\delta_x = \Delta x / X_0; \quad \delta_y = \Delta y / f_n(X_0).$$

Для измерительных преобразователей с линейной номинальной функцией преобразования относительная погрешность по входу или по выходу определяется в следующем виде:

$$\delta_x = \frac{C_n - C_0}{C_0}, \quad \delta_y = \frac{S_0 - S_n}{S_n},$$

где:  $C_0$  и  $S_0$  - действительные значения постоянной и чувствительности измерительного преобразователя соответственно.

Учитывая, что  $C = 1 / S$ ,  $\delta_x = \delta_y$ .

В зависимости от характера проявления различают *систематическую* и *случайную* составляющие погрешности средств измерений.

**Систематическая** составляющая погрешности средств измерений остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях. Например, составляющая погрешности равноплечих весов, обусловленная неравенством единице отношения длин плеч весов.

**Случайная** составляющая погрешности средств измерений изменяется случайным образом при повторных измерениях. Например, составляющая погрешности равноплечих весов, обусловленная случайным влиянием трения в опоре коромысла весов.

Случайные составляющие погрешности приводят к неоднозначности показаний. Поэтому эти составляющие погрешности стараются сделать незначительными по сравнению с другими составляющими.

При работе средства измерений в динамическом режиме появляется *динамическая погрешность*, обусловленная динамическими свойствами средства измерений.

**Динамическая погрешность** определяется как разность между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью (погрешностью в статическом режиме), соответствующей значению входной величины в данный момент времени.

Возникновение динамической погрешности обусловлено инертными свойствами элементов измерительной цепи средства измерений.

Погрешности средств измерений часто существенно зависят от условий эксплуатации (от влияющих величин), поэтому их принято делить на *основную* и *дополнительные*.

**Основная погрешность** средства измерений - погрешность средства измерений, используемого в так называемых *нормальных условиях*.

**Дополнительная погрешность** средства измерений - изменение погрешности средства измерений, вызванное отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области значений.

Функциональная зависимость изменения погрешности средства измерений (или иной метрологической характеристики средства измерений) от изменения влияющей величины называют *функцией влияния*. Коэффициент пропорциональности линейной функции влияния называют *коэффициентом влияния*.

При анализе погрешностей средств измерений под *влияющими величинами* понимают величины не являющиеся измеряемыми данным средством измерений, но оказывающими влияние на результаты измерений этим средством. К таким величинам относят *внешние влияющие величины* и *неинформативные параметры входного сигнала*.

В свою очередь, внешние влияющие величины разделяют на:

- *климатические* (температура, влажность окружающего воздуха, атмосферное давление);
- *механические* (внешние вибрации, тряска, удары);
- *внешние поля* (магнитное, электрическое, гравитационное, тепловое, радиационное);

- *параметры окружающей среды* (наличие в окружающей среде определенных газов, абразивных частиц, капель агрессивных жидкостей и пр.).

**Нормальными условиями** применения средств измерений называют условия, при которых влияющие величины имеют нормальные значения или находятся в нормальной области значений.

Нормальные условия устанавливают (*нормируют*) в нормативных документах на средства измерений.

Подгонка параметров, градуировка средств измерений при их производстве или ремонте осуществляется при нормальных условиях. При этом регулировка параметров средств измерений осуществляется таким образом, чтобы погрешности средств измерений при нормальных условиях были минимальными. Поэтому для средства измерений определяющим является не само значение влияющей величины, принятое в качестве нормального, а отклонение этой величины от нормального значения. В связи с этим нормальное значение одной и той же влияющей величины для разных средств измерений (или в разных странах) может быть различным.

Например, на пространстве СНГ для многих средств измерений нормальной температурой окружающего воздуха принята температура, равная плюс 20 °С, а в странах Европы и, в настоящее время, для отечественных средств измерений, выполненных по международным стандартам МЭК (Международная электротехническая комиссия), нормальной температурой считается плюс 23 °С.

При создании нормальных условий для средств измерений технически сложно обеспечить для каждой влияющей величины определенные фиксированные значения. Поэтому обычно для влияющих величин устанавливают нормальные области значений.

Например, для определенного средства измерений записывают - нормальная область температур окружающего воздуха - плюс (23 ± 2) °С.

Нормальные области значений влияющих величин выбирают таким образом, чтобы совокупное влияние этих величин со значениями, соответствующими граничным

значениям нормальных областей, при самом неблагоприятном сочетании этих значений не приводило бы к изменению погрешности средства измерений более чем на  $1/3$  допускаемого значения его основной погрешности.

Наряду с нормальными условиями применения, для всех средств измерений устанавливают также *рабочие условия* применения.

**Рабочими условиями** применения средства измерений называются интервалы значений влияющих величин, для которых нормированы погрешности средства измерений.

Применение средств измерений в условиях отличных от рабочих условий является **недопустимым**.

Важной характеристикой средств измерений является *вариация выходного сигнала* (для измерительных приборов - *вариация показаний* или *размах показаний*).

Вариация может быть определена в значениях входной величины (*вариация по входу*) или в значениях выходной величины (*вариация по выходу*).

В первом случае вариация это разность значений входной величины, соответствующих одному и тому же значению выходной величины при плавной установке этого значения путем изменения входной величины от больших значений к меньшим и от меньших значений к большим. Во втором случае вариация определяется как разность повторных значений выходной величины (размах показаний для измерительных приборов), соответствующих одному и тому же значению входной величины.

Различают погрешности конкретного экземпляра средства измерений и *погрешности типа* средств измерений.

При этом под термином «**тип средства измерений**» понимают совокупность экземпляров средств измерений одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технологической документации.

Средства измерений одного типа могут иметь различные модификации (например, отличаться по диапазону измерений).

Погрешность конкретного средства измерений характеризует только данный экземпляр. Такая погрешность

обычно известна только для средств измерений, изготовленных в единичном экземпляре, или прошедших специальную процедуру индивидуальной калибровки.

Погрешности типа средств измерений характеризуют всю совокупность экземпляров данного типа. Следует учитывать, что метрологические свойства любого данного экземпляра средства измерений определенного типа отличаются от метрологических свойств совокупности средств измерений этого же типа.

Примером может служить систематическая составляющая погрешности. Для конкретного экземпляра средства измерений эта погрешность вполне *детерминированная величина*, а для типа средств измерений - *случайная величина*, меняющаяся от экземпляра к экземпляру. При этом считается, что погрешность любого экземпляра данного типа не превосходит погрешности типа.

### **3.3. Нормирование метрологических характеристик средств измерений**

В практической метрологической деятельности наиболее часто возникает необходимость решения следующих задач:

- оценка возможной погрешности измерения заданной величины, данным средством измерений, в заданных условиях;
- выбор средства измерений для измерения заданной величины, в заданных условиях, с заранее установленной погрешностью (эта задача является обратной по отношению к предыдущей).

Решение указанных задач возможно только при наличии информации о пределах допускаемых значений всех метрологических характеристик средства измерений. Поэтому метрологические характеристики средств измерений подлежат *нормированию* - установлению номинальных значений и границ допускаемых отклонений реальных метрологических характеристик средств измерений от их номинальных значений.

При нормировании метрологических характеристик средств измерений следует обеспечить возможность оценки

метрологических свойств, как типа средств измерений, так и единичных экземпляров средств измерений данного типа.

Кроме того, нормируемые метрологические характеристики должны давать исчерпывающую информацию о всех метрологических свойствах средства измерений и быть технически доступными для их контроля.

Общие вопросы нормирования метрологических характеристик средств измерений регламентированы в ГОСТ 8.009-84. В стандарте приведены общая номенклатура метрологических характеристик, подлежащих нормированию, способы нормирования и формы представления нормированных метрологических характеристик.

Оценка погрешности измерения обычно проводится расчетным путем и практически сводится к суммированию различных ее составляющих, таких как методическая погрешность, составляющие погрешности средств измерений, ошибки оператора, погрешности, обусловленные влиянием средств измерений на объект измерений, и целого ряда других, большая часть из которых представляет собой случайные величины или случайные процессы. Поэтому ГОСТ 8.009-84 устанавливает такие нормируемые метрологические характеристики, чтобы можно было производить статистическое суммирование составляющих погрешности измерений, в том числе и составляющих погрешности средства измерений.

Нормируемые метрологические характеристики средств измерений принято разделять на следующие группы.

1. *Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправки):*

- функция преобразования измерительного преобразователя, а также измерительного прибора с неименованной шкалой или со шкалой, градуированной в единицах, отличных от единиц входной величины, -  $f(X)$ ;

- значение (значения) однозначной (многозначной) меры -  $Y$ ;

- цена деления шкалы прибора или многозначной меры -  $C_n$ ;

- вид выходного кода, число разрядов кода, цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

## 2. Характеристики погрешностей средств измерений

а) Характеристики систематической составляющей  $\Delta_s$  погрешности средств измерений:

- значение систематической составляющей погрешности  $\Delta_s$
- или значение систематической составляющей погрешности  $\Delta_s$ , математическое ожидание  $M[\Delta_s]$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma[\Delta_s]$  систематической составляющей погрешности.

б) Характеристики случайной составляющей погрешности  $\overset{\circ}{\Delta}$ , включающие:

- среднее квадратическое отклонение  $\sigma[\overset{\circ}{\Delta}]$  случайной составляющей погрешности

- или среднее квадратическое отклонение  $\sigma[\overset{\circ}{\Delta}]$  случайной составляющей погрешности, нормализованная автокорреляционная функция  $r_{\overset{\circ}{\Delta}}(\tau)$  или функция спектральной плотности  $S_{\overset{\circ}{\Delta}}(\omega)$  случайной составляющей погрешности.

в) Характеристика случайной составляющей  $\overset{\circ}{\Delta}_H$  погрешности от гистерезиса - вариация  $H$  выходного сигнала (показания).

г) Характеристика погрешности - значение погрешности.

## 3. Характеристики чувствительности средства измерений к влияющим величинам:

- функции влияния  $\Psi(\xi)$ ;
- изменения  $\varepsilon(\xi)$  значений метрологических характеристик средств измерений, вызванные изменениями влияющих величин  $\xi$  в установленных пределах.

## 4. Динамические характеристики средств измерений:

- полные динамические характеристики;
- частные динамические характеристики.

## 5. Характеристики взаимодействия средств измерений с объектом измерений и подключенными к его выходу какими-либо компонентами:

- входной и выходной импеданс.

Нормированию подлежат также *неинформативные параметры входного сигнала* средств измерений.

Из указанного перечня для конкретных средств измерений выбирают характеристики, достаточные для оценки погрешности измерений данным средством и регламентируют их в нормативных документах на средства измерений.

Типовые характеристики **первой группы** нормируют как номинальные характеристики средств измерений данного типа (например, стандартная градуировочная характеристика термоэлектрического преобразователя температуры, номинальное значение массы гири). Для конкретных экземпляров средств измерений, предназначенных для применения с одной или несколькими индивидуальными характеристиками, нормируют пределы, в которых должна находиться индивидуальная характеристика (например, границы действительных значений  $\varepsilon$ ,  $d$ ,  $s$  нормальных элементов определенного типа).

Номинальная функция преобразования может быть представлена в виде формулы, таблицы, графика. Линейная функция преобразования, проходящая через начало координат, часто представляется в виде коэффициента преобразования (например, номинальный коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока).

Характеристики **второй группы** нормируют:

а) для характеристик систематической составляющей погрешности средств измерений путем установления:

- пределов  $\Delta_{sp}$  допускаемой систематической составляющей погрешности средств измерений данного типа;

- или пределов  $\Delta_{sp}$  допускаемой систематической составляющей погрешности, математического ожидания  $M[\Delta_s]$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma[\Delta_s]$  систематической составляющей погрешности средств измерений данного типа;

б) для характеристик случайной составляющей погрешности путем установления:

- предела  $\sigma_p[\overset{\circ}{\Delta}]$  допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности средств измерений данного типа;

- или предела  $\sigma_p[\overset{\circ}{\Delta}]$  допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности, номинальной нормализованной автокорреляционной функции  $r_{\Delta sf}(\tau)$  или номинальной функции спектральной плотности  $S_{\Delta sf}(\omega)$  случайной составляющей погрешности и пределов допускаемых отклонений этих функций, от номинальных;

в) для характеристики случайной составляющей погрешности от гистерезиса путем установления предела (без учета знака)  $H_p$  допускаемой вариации выходного сигнала (показания) средства измерений данного типа.

Нормированные характеристики погрешности средств измерений представляют числом или функцией (формула, таблица, график).

Характеристики **третьей группы** нормируют путем установления:

- номинальной функции влияния  $\psi_{sf}(\xi)$  и пределов допускаемых отклонений от нее;

- или граничных функций влияния верхней  $\psi^*(\xi)$  и нижней  $\psi_*(\xi)$ ;

- или пределов  $\varepsilon_p(\xi)$  допускаемых изменений метрологических характеристик при изменении влияющей величины в заданных границах.

Пределы допускаемых изменений погрешности средства измерений называют пределами допускаемой дополнительной погрешности.

Перечисленные характеристики нормируют для каждой влияющей величины отдельно. Допускается функции влияния и пределы допускаемых изменений погрешности нормировать для совместных изменений нескольких влияющих величин.

Граничные функции влияния обычно нормируют для средств измерений, характеризующихся значительным разбросом функций влияния от экземпляра к экземпляру. В силу этого номинальную функцию влияния не нормируют. При применении таких средств измерений, в случае необходимости, определяют функции влияния, индивидуальные для каждого экземпляра средства измерений. Нормированные граничные функции влияния используют для контроля качества средств измерений.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности часто выражают в долях предела допускаемой основной погрешности.

Характеристики **четвертой группы** нормируют путем установления номинальных, полных или частных динамических характеристик, представляемых числом или функцией и пределов допускаемых отклонений от нее.

Предпочтительной для нормирования является такая динамическая характеристика, экспериментальное определение которой может быть осуществлено с необходимой точностью и наиболее простым методом.

Характеристики **пятой группы** нормируют путем установления номинальных характеристик и пределов допускаемых отклонений от них или путем установления граничных характеристик.

Метрологические характеристики нормируют для рабочих и нормальных условий применения. Если дополнительные погрешности пренебрежимо малы, характеристики нормируют только для рабочих условий.

### 3.4. Классы точности средств измерений

Для сравнения между собой по точности разных средств измерений одного *вида*, т. е. предназначенных для измерений одной и той же величины, применяют понятие *класс точности*.

**Класс точности средств измерений** – это обобщенная характеристика данного типа средств измерений, отражающая уровень их точности, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими

характеристиками средств измерений, влияющими на их точность.

Следует отметить, что класс точности не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых данным средством измерений. Класс точности, хотя и характеризует в обобщенном виде совокупность метрологических свойств данного средства измерений, но не определяет однозначно точность измерений, так как последняя зависит также от метода измерений и условий их проведения.

Классы точности средств измерений устанавливаются в стандартах или технических условиях, содержащих технические требования к средствам измерений, подразделяемым по точности. Средствам измерений с несколькими диапазонами измерений одной и той же величины или предназначенным для измерений разных величин могут быть присвоены различные классы точности для каждого диапазона или каждой измеряемой величины.

*Пример*

- для многодиапазонных электроизмерительных амперметров могут быть для отдельных диапазонов присвоены различные классы точности.

- для вольтметра могут быть присвоены два класса точности: один как вольтметру, другой – как омметру

Классы точности цифровых измерительных приборов со встроенными вычислительными устройствами для дополнительной обработки результатов измерений устанавливают без учета режима обработки.

Средства измерений должны удовлетворять требованиям к метрологическим характеристикам, установленным для присвоенного класса точности, как при выпуске из производства, так и в процессе их эксплуатации.

Обозначения классов точности наносятся непосредственно на средства измерений и указываются в технической документации на средства измерений.

Обозначения классов точности определяются формой выражения пределов допускаемых основной и дополнительных погрешностей средств измерений. В свою очередь, форма выражения пределов допускаемых погрешностей выбирается с

учетом конструкции, принципа действия, условий применения и назначения средств измерений и в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений.

Выбранная форма выражения предела допускаемой погрешности конкретного типа средства измерений должна максимально соответствовать особенностям этого средства измерений и характеру изменения его погрешностей по диапазону измерений.

Для ряда мер (меры электродвижущей силы – нормальные элементы, меры электрического сопротивления - катушки электрического сопротивления) устанавливают классы точности, определяемые не пределами допускаемой погрешности, как это отмечалось выше, а пределами допускаемого изменения в течение года величины, воспроизводимой мерой, в процентах.

Основные требования к формам выражения пределов допускаемых погрешностей средств измерений и обозначениям их классов точности приведены в ГОСТ 8.401-80.

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей средств измерений выражают в форме *абсолютных, приведенных, относительных погрешностей*.

Предпочтительным является выражение пределов допускаемых дополнительных погрешностей средств измерений в форме, соответствующей форме выражения пределов допускаемой основной погрешности, при этом допускается выражать пределы допускаемых дополнительных погрешностей и в иной форме.

**Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности**, выраженной в единицах измеряемой величины или, условно, в делениях шкалы измерительного прибора устанавливают в виде:

$$\Delta = \pm a \quad (3.4.1)$$

или

$$\Delta = \pm (a + b \cdot x), \quad (3.4.2)$$

где:  $\Delta$  - предел допускаемой абсолютной основной погрешности;

$x$  - значение измеряемой величины на входе (выходе) средства измерений или число делений, отсчитанных по шкале измерительного прибора;

$a, b$  - положительные числа, не зависящие от  $x$ .

Пределы допускаемой абсолютной погрешности могут устанавливаться также по более сложной формуле, или в виде графика или таблицы.

В виде (3.4.1) устанавливают пределы допускаемой основной погрешности однозначных мер, а также измерительных преобразователей и приборов с примерно постоянной по диапазону измерений абсолютной погрешностью (гири, штангенциркули, термометры сопротивления). По формуле (3.4.2) устанавливают пределы допускаемой погрешности для измерительных преобразователей и приборов с монотонно изменяющейся по диапазону измерений абсолютной погрешностью (равноплечие весы).

Пределы допускаемой погрешности выражают в виде абсолютной погрешности также для средств измерений, применяемых в тех областях измерений, в которых принято погрешности результатов измерений выражать в единицах измеряемых величин. Например, пределы допускаемых погрешностей мер массы (длины) выражают в форме абсолютных погрешностей, так как погрешности результатов измерений массы (длины) обычно принято выражать в единицах этих величин.

При выражении пределов допускаемой абсолютной основной погрешности по формулам (3.4.1) и (3.4.2) классам точности присваиваются порядковые номера, обозначаемые римскими цифрами (I, II, III ...) или прописными буквами латинского алфавита (A, B, C ...). При этом цифрам, обозначающим меньшие числа, или буквам, находящимся ближе к началу алфавита, соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей.

**Пределы допускаемой приведенной основной погрешности** (в процентах) устанавливают по формуле:

$$\gamma = 100 \cdot \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \quad (3.4.3)$$

где  $\Delta$  - пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (3.4.1);

$X_N$  - нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и  $\Delta$ ;

$p$  - отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда:

$$(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \cdot 10^n; \quad (n = 1, 0; -1, -2, \text{ и т. д.}).$$

В виде (3.4.3) устанавливают пределы допускаемой основной погрешности однозначных мер, а также измерительных преобразователей и приборов с примерно постоянной по диапазону измерений абсолютной погрешностью (однозначные меры электрического сопротивления, шунты, манометры, электромеханические электроизмерительные приборы).

Нормирующее значение  $X_N$  принимают равным верхнему пределу измерений, полу сумме верхнего и нижнего пределов измерений, диапазону измерений, номинальному значению и ряду других, неизменных для данного типа средств измерений, значений.

*Пример:*

*Для миллиамперметра, предназначенного для измерения постоянного электрического тока в диапазоне (-10 - 0 - +10) мА, в качестве нормирующего значения принимают -  $X_N = 20$  мА.*

*Для милливольтметра, предназначенного для измерения температуры в комплекте с термоэлектрическим преобразователем температуры (прибор, имеющий шкалу с так называемым «условным нулем») в диапазоне от 200 до 600 °С, в качестве нормирующего значения принимают -  $X_N = 400$  °С.*

*Для частотомеров с диапазоном измерения (45 - 55) Hz и номинальной частотой 50 Hz, нормирующее значение  $X_N = 50$  Hz.*

Обозначение классов точности в этом случае численно равно пределу допускаемой основной приведенной погрешности.

Например, если  $\gamma = \pm 1,5 \%$ , то обозначение класса точности - **1,5**.

Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой и примерно постоянной по диапазону измерений абсолютной основной погрешностью, выраженной в единицах длины шкалы (например, для омметров), предел допускаемой основной погрешности также устанавливают формулой (3.4.3), но при этом  $\Delta$  и  $X_N$  выражают в единицах длины шкалы, а за нормирующее значение  $X_N$  выбирают длину шкалы или длину рабочей части шкалы.

Такую форму выражения предела допускаемой основной погрешности называют *линейноприведенной погрешностью* ( $\gamma_{л.п}$ ) и этой форме соответствует специальное обозначение класса точности.

Например, если  $\gamma_{л.п} = \pm 2,5 \%$ , то обозначение класса точности - **2,5**.

**Пределы допускаемой относительной основной погрешности** (в процентах) устанавливают по формуле:

$$\delta = 100 \cdot \frac{\Delta}{x} = \pm q, \quad (3.4.4)$$

где:  $\Delta$  - установлено по формуле (3.4.1), или по формуле:

$$\delta = 100 \cdot \frac{\Delta}{x} = \pm \left[ c + d \cdot \left( \left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \quad (3.4.5)$$

где:  $\Delta$  - установлено по формуле (3.4.2);

$X_k$  - больший (по модулю) из пределов измерений;

$q$  - отвлеченное положительное число;

$c$  и  $d$  - положительные числа, определяемые, в свою очередь, по формулам:

$$c = 100 \cdot \left( b + \frac{a}{|X_k|} \right), d = 100 \cdot \frac{a}{|X_k|}.$$

Значения  $q$ ,  $c$ , и  $d$  в формулах (3.4.4) и (3.4.5) выбирают из того же ряда, что и значение  $p$ .

По форме (3.4.4) устанавливают пределы допускаемой относительной погрешности для средств измерений с примерно постоянной по диапазону измерений относительной основной погрешностью (высокоомные многозначные меры электрического сопротивления, счетчики воды, электроэнергии).

Этой форме выражения пределов допускаемой погрешности также соответствует специальный вид обозначения класса точности.

*Например, если  $\delta = \pm 0,5 \%$ , то обозначение класса точности - **0,5**.*

По форме (3.4.5) устанавливают пределы допускаемой относительной погрешности для средств измерений с существенно изменяющейся по диапазону измерений относительной основной погрешностью (низкоомные многозначные меры электрического сопротивления, многие цифровые приборы).

В этом случае если, например,  $c = 0,1 \%$ , а  $d = 0,05 \%$ , то класс точности обозначают - **0,1/0,05**.

В нормативных документах, устанавливающих классы точности средств измерений конкретного вида, должны быть приведены способы выражения пределов допускаемых погрешностей и других метрологических характеристик.

Пределы допускаемых погрешностей должны быть выражены не более чем двумя значащими цифрами, причем погрешность округления при вычислении пределов должна быть не более 5 %.

### 3.5. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов

В настоящее время измерения, связанные с определением состава и свойств веществ и материалов, имеют очень широкое распространение и играют ответственную роль во многих областях народного хозяйства. Это геофизические исследования, добыча и обогащение полезных ископаемых, сельскохозяйственное производство, мелиорация и рекультивация земель, охрана и мониторинг окружающей среды, здравоохранение. Сюда же входят санитарно-эпидемиологическая служба, горнорудная, угольная, нефтегазовая, химическая, пищевая отрасли промышленности, черная и цветная металлургия. При этом объектами измерений являются сотни тысяч веществ и материалов от самых простых до сложнейших биологических объектов, а измеряемая величина может меняться в пределах  $(10^{-9} - 99,99999) \%$ .

Указанное многообразие измерений не может основываться на независимых или стихийно складывающихся принципах, так как это привело бы к излишним трудозатратам и малооправданным расходам и нуждается в упорядочении на единой научно-методической основе, обеспечивающей правильность и достоверность всех получаемых результатов.

Существенная специфичность измерительных процедур, сложности, связанные с хранением и передачей размеров единиц состава и свойств веществ и материалов, приводят к необходимости применения особых приемов и инструментов решения этих задач. Главным и, часто единственным, средством хранения и передачи размеров единиц при измерениях состава и, в ряде случаев, свойств веществ и материалов являются *стандартные образцы (СО) состава и свойств веществ и материалов*, представляющие собой, как это было отмечено выше, один из видов средств измерений - меры.

От привычных всем мер (меры массы, длины, меры электрических величин), СО существенно отличаются своим внешним видом и назначением. Обычно СО представляют собой некое вещество или материал, в котором определенным образом, чаще всего путем экспериментальных исследований, установлены одно или несколько значений величин, характеризующих состав и (или) свойство этого вещества

(материала). СО могут воспроизводить величины, характеризующие как состав - *СО состава*, так и свойство - *СО свойств*, а так же и состав, и свойство - *СО состава и свойств*. Из многочисленных величин, отражающих соответствующие свойства, присущие конкретному веществу (материалу), стандартные образцы предназначены для воспроизведения размеров только тех величин, для которых возможна их количественная оценка путем измерений при контроле и практическом использовании этого вещества (материала).

Специфичность СО заключается также и в том, что многие СО, в особенности СО состава, расходятся физически или теряют аттестованные свойства в процессе измерения и дальнейшему использованию не подлежат. Поэтому для большинства СО устанавливают *срок годности*.

Другим отличием СО, в особенности СО состава, является разовость их производства.

Потребительские свойства СО, как и любого средства измерений, определяются их метрологическими характеристиками.

Основными метрологическими характеристикам СО являются *аттестованное значение* и его *погрешность*, *однородность* и *погрешность от неоднородности*, которые устанавливаются в процессе аттестации СО, *временная стабильность*.

Значения аттестуемой характеристики СО нормируют путем установления *интервала*, в котором должно находиться аттестованное значение любого экземпляра СО данного типа, либо путем указания *номинального значения* и *допускаемых отклонений* от него.

В качестве примеров можно указать:

- массовая доля углерода должна быть в диапазоне от 0,50 до 0,63 % включительно;

- номинальное значение массовой концентрации гексахлорциклогексана -  $0,1 \text{ mg/cm}^3$ ; допускаемое отклонение аттестованных значений должно находиться в пределах  $\pm 5 \%$  от номинального.

Интервал допускаемых значений аттестуемой характеристики СО устанавливает ограничения на рассеяние

аттестованных значений отдельных экземпляров СО, отнесенных к данному типу.

Характеристику **погрешности аттестованного значения** СО нормируют путем установления *границ допуссаемого значения* погрешности аттестованного значения СО данного типа с вероятностью  $P$ .

Характеристику погрешности аттестованного значения СО нормируют в форме *абсолютных* или *относительных* погрешностей. При этом вероятность  $P$ , как правило, принимают равной 0,95.

Характеристику **погрешности от неоднородности** СО нормируют путем установления *предела допуссаемого значения среднего квадратического отклонения* значения аттестуемой характеристики при заданной наименьшей представительной пробе.

**Срок годности** экземпляра СО нормируют в виде *номинального* или *наибольшего допуссаемого интервала времени*, в течение которого гарантируется стабильность метрологических характеристик СО.

**Действительное значение аттестуемой характеристики** СО (аттестованное значение СО) представляют именованным числом, выражающим значение воспроизводимой СО физической величины в единицах, допущенных к применению. Наименьший десятичный разряд числового значения аттестуемой характеристики СО должен соответствовать наименьшему десятичному разряду числового значения абсолютной погрешности.

**Характеристику погрешности аттестованного значения** СО выражают в виде границ (нижней и верхней) доверительного интервала для вероятности  $P$ . При одинаковых абсолютных значениях нижней и верхней границ погрешности в качестве аттестованного значения СО указывают границу доверительного интервала. При различных числовых значениях нижней и верхней границ погрешности в качестве характеристики погрешности аттестованного значения СО указывают значения нижней и верхней границ.

Характеристики погрешности указывают в единицах аттестованного значения СО (абсолютные) или в процентах по отношению к аттестованному значению СО (относительные).

Характеристики погрешности выражают числом, содержащим не более двух значащих цифр. Одной или двумя значащими цифрами характеристику погрешности выражают в том случае, когда цифра старшего десятичного разряда равна или меньше 3 (трех). В случае, когда эта цифра больше 3, характеристика погрешности выражается одной значащей цифрой.

*Примечание - При округлении результатов вычислений последнюю цифру в значении характеристики погрешности увеличивают на единицу, если следующая за ней цифра больше или равна 5, в противном случае последняя цифра в значении характеристики погрешности остается без изменения.*

*Примеры представления аттестуемых характеристик и погрешностей аттестованного значения СО:*

*а) аттестуемая характеристика СО - молярная концентрация глюкозы;*

*- аттестованное значение СО: 40,00 mmol/dm<sup>3</sup>;*

*- абсолютная погрешность аттестованного значения СО: 0,12 mmol/dm<sup>3</sup>, P = 0,95;*

*б) аттестуемая характеристика СО - массовая доля калия хлористого;*

*- аттестованное значение СО: 99,8 %;*

*- абсолютная погрешность аттестованного значения СО: (-0,2 - + 0,4) %, P = 0,95;*

*в) аттестуемая характеристика СО - относительная диэлектрическая проницаемость;*

*- аттестованное значение СО: 2,03 относительных единиц;*

*- относительная погрешность аттестованного значения СО: 101 1 %, P = 0,95.*

Допускается представление аттестованного значения СО доверительным интервалом, покрывающим с известной (указываемой) доверительной вероятностью истинное значение аттестуемой характеристики. При этом погрешность аттестованного значения СО отдельно не указывают.

### *Пример*

*- аттестуемая характеристика СО - массовая доля меди;  
аттестованное значение СО: от 0,28 до 0,32 %; P = 0,95.*

Характеристику погрешности от неоднородности СО выражают средним квадратическим отклонением абсолютной или относительной погрешности от неоднородности с указанием наименьшей представительной пробы.

Срок годности экземпляра СО выражают количеством лет или месяцев.

Установление верхнего предела срока годности СО не ограничивается. Если срок годности не установлен или установленный срок годности СО превышает 10 лет, то не реже чем один раз в 10 лет проводится проверка метрологических характеристик СО, при этом порядок проверки должен оговариваться в инструкции по применению СО, либо в отдельном документе, регламентирующем такую процедуру.

В метрологической практике стандартные образцы применяются при измерениях в процессе:

- поверки, калибровки, испытаний, метрологической аттестации, градуировки средств измерений;
- метрологической аттестации методик выполнения измерений;
- контроля погрешностей методик выполнения измерений в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами, а так же для других видов метрологического контроля.

В некоторых видах измерений, СО могут входить в качестве эталонов (образцовых средств измерений) в состав поверочных схем и применяться для передачи размеров единиц величин.

Применение СО в соответствии с их назначением осуществляется согласно требованиям и правилам, установленным:

- нормативными документами на методику измерений (испытаний, анализа, контроля);
- нормативными документами на методы поверки, калибровки, градуировки средств измерений;
- технологической и конструкторской документацией на процессы контроля и испытаний продукции.

Конкретный порядок применения СО устанавливают в инструкции по применению, прилагаемой к паспорту СО, если этот порядок не оговорен с достаточной полнотой в иных документах.

### **3.6. Погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации**

В метрологической практике часто возникает необходимость предварительной оценки возможной погрешности конкретного средства измерений, используемого в заданных условиях.

В общем случае такая оценка проводится с использованием нормируемых значений метрологических характеристик средства измерений и сводится к суммированию пределов допускаемых основной и дополнительной погрешностей средства измерений.

Дополнительная погрешность средства измерений состоит, в свою очередь, из ряда составляющих, обусловленных собственными свойствами элементов и материалов, используемых в средстве измерений, а также реакции средства измерений на изменение влияющих величин.

В зависимости от задач измерений, экономической целесообразности и доступности исходной информации обычно для расчета характеристик погрешности средств измерений в заданных условиях применяют один из двух рассмотренных ниже методов.

Оба метода расчета базируются на использовании в качестве исходных данных метрологических характеристик средств измерений, предусмотренных ГОСТ 8.009-84.

**Первый метод** основан на расчете статистических моментов составляющих погрешности средства измерений и позволяет определить следующие характеристики погрешности средства измерений: математическое ожидание  $M[\Delta_{СИ}]$  и среднее квадратическое отклонение погрешности  $\sigma[\Delta_{СИ}]$  средства измерений, нижнюю  $\Delta_{СИн}$  и верхнюю  $\Delta_{СИв}$  границы интервала, в котором с вероятностью  $P_{\Delta}$  находится погрешность. Этот метод при числе составляющих погрешности

средства измерений более трех дает рациональную оценку погрешности за счет пренебрежения редко встречающимися ее составляющими, для чего назначается  $P_{\Delta} < 1$ .

При расчете погрешности средства измерений в заданных условиях в качестве исходных данных используют нормируемые метрологические характеристики средства измерений, а также характеристики влияющих величин и характеристики входного сигнала.

Из числа нормируемых метрологических характеристик средства измерений используют:

- математическое ожидание систематической составляющей погрешности;
- среднее квадратическое отклонение систематической составляющей основной погрешности;
- предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности;
- предел допускаемой вариации при нормальных условиях;
- номинальные функции влияния на систематическую составляющую погрешности;
- номинальные функции влияния на среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности;
- номинальные функции влияния на вариацию;
- одну из полных номинальных динамических характеристик.

**Второй метод** позволяет провести расчет наибольших возможных значений составляющих погрешности средств измерений и определить характеристики погрешности средства измерений (нижнюю  $\Delta_{\text{Син}}$  и верхнюю  $\Delta_{\text{Сив}}$  границы интервала, в котором с вероятностью  $P_{\Delta}$  находится погрешность) только при  $P_{\Delta} = 1$ . Данный метод при числе составляющих погрешности более трех дает грубую, но надежную оценку погрешности средства измерений, включающую в себя, в отличие от первого метода, редко реализуемые составляющие погрешности.

Второй метод расчета погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации целесообразно использовать, если:

- хотя бы маловероятное нарушение требований к точности измерений может привести к серьезным отрицательным

техническим или экономическим последствиям или связано с угрозой здоровью и жизни людей;

- завышение требований к метрологическим характеристикам средства измерений, к которому приведет применение этого метода расчета при заданной норме точности измерений, и связанные с этим дополнительные затраты не препятствуют применению такого средства измерений.

Для расчета характеристик погрешности средства измерений вторым методом используют следующие исходные данные.

а) Нормируемые метрологические характеристики средства измерений

- предел  $\Delta_{ор}$  допускаемого значения основной погрешности;
- наибольшие допускаемые изменения  $\varepsilon_p(\xi_j)$  погрешности, вызванные изменением влияющих величин в установленных пределах;
- номинальная амплитудно-частотная характеристика  $A_{st}(\omega)$ .

б) Характеристики влияющих величин  $\zeta_j$

- значения  $\zeta_j$  влияющих величин ( $j = 1, 2 \dots n$ );

- наименьшие  $\zeta_{нj}$  и наибольшие  $\zeta_{вj}$  значения влияющих величин, соответствующие реальным условиям эксплуатации средства измерений.

в) Характеристики входного сигнала  $x$

- нижняя  $\omega_n$  и верхняя  $\omega_v$  границы спектра частот входного сигнала средства измерений.

При выполнении расчетов по первому или второму методам все исходные данные, используемые для расчета, должны быть приведены к одной и той же точке схемы измерений, входу или выходу средства измерений. Исходные данные должны быть выражены в виде, обеспечивающем получение всех составляющих погрешности средства измерений в одних и тех же абсолютных или относительных (в долях или процентах от одного и того же значения измеряемой величины) единицах.

В исходные данные при расчетах могут учитываться не все метрологические характеристики, установленные для данного средства измерений, если некоторые из них несущественны для конкретного измерения.

При расчетах учитывают только те влияющие величины, для которых нормированы метрологические характеристики средства измерений, и значения которых в момент измерения отличаются от установленных для данного средства измерений нормальных значений.

Расчет погрешности средства измерений в реальных условиях эксплуатации подробно изложен в межгосударственном нормативном руководящем документе РД 50-453-84.

*Пример.*

*Расчет характеристик погрешности при заданных условиях применения аналогового электронного вольтметра постоянного тока по первому методу*

В качестве исходных данных для расчета использованы следующие нормированные метрологические характеристики для нормальных условий применения и значения этих характеристик, приведенные в нормативном документе на вольтметр:

1) предел допускаемой систематической составляющей основной погрешности  $\Delta_{\text{osp}} = 10 \text{ mV}$ ;

2) предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности  $\sigma_p[\dot{\Delta}_o] = 5 \text{ mV}$ ;

3) номинальная функция влияния температуры окружающего воздуха на систематическую составляющую погрешности

$$\psi_{s,\text{sf},t}(t) = K_{s,\text{sf},t} \cdot (t - t_n),$$

где:  $t_n$  - нормальная температура воздуха ( $t_n = +20 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$K_{s,\text{sf},t}$  - номинальный коэффициента влияния температуры окружающего воздуха ( $K_{s,\text{sf},t} = 0,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ );

4) номинальная функция влияния напряжения питания на систематическую составляющую погрешности

$$\psi_{s,\text{sf}}(U) = K_{s,\text{sf},u} \cdot (U - U_n),$$

где:  $U_n$  - номинальное напряжение питания ( $U_n = 220 \text{ V}$ );

$K_{s,\text{sf},u}$  - номинальный коэффициента влияния напряжения питания на систематическую составляющую погрешности ( $K_{s,\text{sf},u} = 0,4 \text{ mV/V}$ );

5) номинальная функция влияния температуры окружающего воздуха на среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности

$$\psi_{\sigma,\text{sf},t}(t) = K_{\sigma,\text{sf},t} \cdot (t - t_n),$$

где:  $K_{\sigma,\text{sf},t}$  - номинальный коэффициент влияния температуры окружающего воздуха на среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности ( $K_{\sigma,\text{sf},t} = 0,1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ );

6) номинальная функция влияния напряжения питания на среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности

$$\psi_{\sigma,\text{sf},u}(U) = K_{\sigma,\text{sf},u} \cdot (U - U_n),$$

где:  $K_{\sigma, sf, u}$  – номинальный коэффициент влияния напряжения питания на среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности -  $K_{\sigma, sf, u} = 0,1 \text{ mV/V}$ .

Характеристики влияющих величин:

- нижняя  $t_n$  и верхняя  $t_b$  границы интервала изменения температуры окружающего воздуха,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , соответственно;

- нижняя  $U_n$  и верхняя  $U_b$  границы изменения напряжения питания,  $200 \text{ V}$  и  $230 \text{ V}$ , соответственно.

Требуется определить характеристики погрешности данного средства измерений, применяемого в заданных условиях.

*Порядок расчета*

А) Для случая, когда нет оснований предполагать несимметричность распределения значений систематической составляющей основной погрешности в интервале  $(-\Delta_{osp}, \Delta_{osp})$  и значений влияющих величин – температуры  $t$  и напряжения питания  $U$  в интервалах  $(t_n, t_b)$ ,  $(U_n, U_b)$ , их математические ожидания (или средние арифметические значения) определяют в следующем виде:

$$M[\Delta_{os}] = 0; \quad M[\bar{t}] = \bar{t} = \frac{25 + 35}{2} = 30 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$M[\bar{U}] = \bar{U} = \frac{200 + 230}{2} = 215 \text{ V}.$$

Поэтому, с учетом выражений для номинальных функций влияния на систематическую составляющую погрешности, получают

$$\Delta_{osp} = 0;$$

$$\psi_{s, sf, t}(\bar{t}) = K_{s, sf, t} \cdot (\bar{t} - t_n) = 0,5 \cdot (30 - 20) = 5 \text{ mV};$$

$$\psi_{s, sf}(\bar{U}) = K_{s, sf, u} \cdot (\bar{U} - U_n) = 0,4 \cdot (215 - 220) = -2 \text{ mV}.$$

Функции влияния на систематическую составляющую основной погрешности представляют собой аддитивные

добавки к ее значению в нормальных условиях. Поэтому ситуационная модель погрешности в заданных (рабочих) условиях применения средства измерений будет композицией предыдущих ситуационных моделей. Её числовые характеристики, т. е. функция влияния на погрешность в заданных условиях получают в следующем виде

$$\Delta_p = \Delta_{osp} + \psi_{s, sf, t}(\bar{t}) + \psi_{s, sf}(\bar{U}) = 0 + 5 - 2 = 3 \text{ mV}.$$

Б) Дисперсия  $D[\Delta_\xi]$  статической составляющей погрешности при заданных характеристиках влияющих величин рассчитывают, в соответствие с РД 50-453-84, по формуле

$$D[\Delta_\xi] = D[\Delta_{os}] + \{ \sigma_p[\dot{\Delta}_o] + K_{\sigma, sf, t} \cdot (t_b - t_n) + K_{\sigma, sf, u} \cdot (U_n - U_n) \}^2 + K_{\sigma, sf, t}^2 \cdot \sigma^2[t] + K_{\sigma, sf, u}^2 \cdot \sigma^2[U]$$

где:  $D[\Delta_{os}]$  – дисперсия систематической составляющей основной погрешности средства измерений;

$\sigma[t]$ ,  $\sigma[U]$  – средние квадратические отклонения значений влияющих величин, соответствующие заданным условиям эксплуатации средства измерений – окружающей температуры и напряжения питания соответственно.

Для случая, когда нет оснований выделить область предпочтительных значений систематической составляющей основной погрешности в интервале  $(-\Delta_{osp}, \Delta_{osp})$  и области предпочтительных значений влияющих величин  $t$  и  $U$  в интервалах  $(t_n, t_b)$ ,  $(U_n, U_b)$ , числовые характеристики ситуационных моделей определяются в следующем

$$D[\Delta_{osp}] = \frac{\Delta_{osp}^2}{3} = \frac{10^2}{3} = 33,3 \text{ mV};$$

$$\sigma[t] = \frac{t_b - t_n}{\sqrt{12}} = \frac{35 - 25}{\sqrt{12}} = 2,9 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\sigma[U] = \frac{U_b - U_n}{\sqrt{12}} = \frac{230 - 200}{\sqrt{12}} = 8,7 \text{ mV}.$$

С учетом номинальных коэффициентов влияния температуры окружающего воздуха и напряжения питания на среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности и граничных значений влияющих величин рассчитывают

$$K_{\sigma, sf, t} \cdot (t_b - t_n) = 0,1 \cdot (35 - 20) = 1,5 \text{ mV};$$

$$K_{\sigma, sf, u} \cdot (U_n - U_n) = 0,1 \cdot (200 - 220) = 2 \text{ mV}.$$

С учетом полученных значений средних квадратических отклонений дисперсия статической составляющей погрешности средства измерений в заданных условиях эксплуатации имеет следующее значение

$$D[\Delta_{\xi}] = 33,3 + (5 + 1,5 + 2)^2 + 0,5^2 \cdot 2,9^2 + 0,4^2 \cdot 8,7^2 = 120 \text{ mV}.$$

В) Расчет дисперсии  $D[\Delta_{dyn}]$  динамической составляющей погрешности средства измерений в заданных условия эксплуатации в приведенном примере не проводится, поскольку в исходных данных отсутствуют динамические характеристики прибора. Поэтому справедливо считать, что

$$D[\Delta_{dyn}] = 0.$$

Г) Расчет характеристик погрешности средства измерений в заданных условиях эксплуатации проводят следующим образом.

а) Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение погрешности средства измерений вычисляют в следующем виде

$$M[\Delta_{СИ}] = M[\Delta_{\xi}] = 3 \text{ mV};$$

$$\sigma [\Delta_{СИ}] = \sqrt{D [\Delta_{\xi}] + D [\Delta_{dyn}]} = \sqrt{120 + 0} = 11 \text{ mV}$$

б) Доверительный интервал погрешности средства измерений

$$\Delta_{СИ} = M[\Delta_{СИ}] \pm K_p \cdot \sigma[\Delta_{СИ}].$$

Если закон распределения погрешности  $\Delta_{СИ}$  может быть отнесен к числу симметричных законов распределения с невозрастающей плотностью по мере удалений от центра распределения, то в качестве значения  $K_P$  может быть принято  $K_{ср}$ .

Значение  $K_{ср}$  может быть определено по графику, предлагаемому РД 50-453-84 и приведенному на рис. 3.3.

Заштрихованная на рис. 3.3. область соответствует возможным значениям  $K_P$ . Разность между кривой  $K_{ср}$  и любой из граничных кривых определяет погрешность коэффициента  $K_{ср}$  (при  $P = 0,95$  эта погрешность лежит в границах  $\pm 16\%$ , при  $P = 0,99$  – в границах  $\pm 30\%$ ).

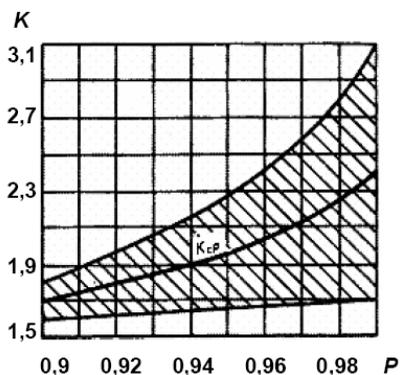


Рис. 3.3. График зависимости коэффициента  $K_{ср}$  от значения заданной вероятности  $P$

Для грубых расчетов, если есть основания предполагать, что закон распределения погрешности  $\Delta_{СИ}$  примерно удовлетворяет выше приведенным условиям, значение  $K_P$  может быть рассчитано по формуле

$$K_P = 5 \cdot (P - 0,5) \text{ для } 0,8 \leq P < 1.$$

Эта формула дает значения  $K_P$  более завышенные по отношению  $K_{ср}$ .

Учитывая, что для значения вероятности  $P = 0,95$  коэффициент  $K_{ср}$  имеет значение 1,95 (по графику рис. 3.3.),

доверительный интервал погрешности средства измерений равен

$$\Delta_{СИ} = (3 \pm 1,95 \cdot 11) = (3 \pm 21,5) \text{ mV}.$$

в) Нижняя  $\Delta_{СИ,н}$  и верхняя  $\Delta_{СИ,в}$  границы доверительного интервала погрешности средства измерений имеют следующие значения

$$\Delta_{СИ,н} = (3 - 21,5) = -18,5 \text{ mV},$$

$$\Delta_{СИ,в} = (3 + 21,5) = 24,5 \text{ mV}.$$

Таким образом, погрешность рассмотренного средства измерений в реальных условиях эксплуатации находится в интервале от минус 18,5 mV до плюс 24,5 mV.

В заключение следует отметить, что характеристики погрешности средства измерений, рассчитанные в соответствии с изложенными процедурами, не следует отождествлять с характеристиками погрешности самого измерения. Помимо погрешности средства измерений погрешность измерения включает в себя методическую составляющую, составляющую от взаимодействия средства измерений с объектом измерения и составляющую, вносимую оператором при отсчете результатов измерения.

### **3.7. Выбор средств измерений**

Правильность выбора средства измерений, в том числе и для технологического контроля, - одна из важнейших задач метрологической практики.

При выборе средств измерений необходимо учитывать совокупность их метрологических, эксплуатационных и экономических показателей, при этом точность средств измерений должна быть согласована с требованиями к предельно допускаемым значениям измеряемых параметров. Выбор средств измерений должен также обеспечивать минимальную себестоимость измерений при заданной их точности. При этом учитывают также требования к

квалификации оператора, наличие конкурирующих средств измерений и их цену, возможность многоцелевого использования данных средств измерений.

Практически, обоснованный выбор средств измерений по точности и с учетом требований достоверности контроля производят при наличии следующих исходных данных:

- установлены параметры объекта, подлежащие измерению;
- заданы значения допустимых отклонений измеряемого параметра;
- заданы значения допустимых вероятностей ложного и необнаруженного отказов (брака контроля) для измеряемого параметра;
- установлены законы распределения отклонений измеряемого параметра и погрешности измерений, возникающей при использовании средства измерений;
- заданы условия измерений – значения влияющих величин, включающие в себя значения внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала.

После определения исходных данных и требований к ограничительным характеристикам (габаритным размерам, массе, производительности и т.д.), которым должно удовлетворять выбираемое средство измерений, устанавливаются требования к метрологическим характеристикам этого средства измерений.

Критериями качества процессов контроля являются показатели достоверности или вероятности ошибок контроля. Идеальное решение задачи контроля состоит в том, чтобы пропустить все изделия, удовлетворяющие заданным нормам на параметры их качества, и не пропустить негодных по этим параметрам изделий, т. е. в безошибочном решении альтернативы – годны или негодны контролируемые изделия.

Однако по ряду субъективных и объективных причин такое идеальное решение задачи контроля невозможно. Вследствие этих причин результаты контроля могут содержать *ошибки первого рода (ложный отказ)* – признание (по результатам контроля) в действительности годного изделия негодным и *ошибки второго рода (необнаруженный отказ)* – признание в действительности негодного изделия годным. *Вероятности*

*ошибок первого ( $P_{\text{ло}}$ ) и второго ( $P_{\text{но}}$ ) рода являются общепринятыми критериями качества процессов контроля.*

Установление соответствия средств измерений требованиям точности, начинается с расчета допускаемого значения суммарной погрешности результатов измерений:

$$\Delta_{\Sigma p} = |\delta_{\text{кп}}| \cdot R$$

где:  $\Delta_{\Sigma p}$  – допускаемое значение суммарной погрешности результатов измерений;

$\delta_{\text{кп}}$  – допускаемое отклонение контролируемого параметра;

$R$  – допускаемое соотношение между суммарной погрешностью измерений и допускаемым отклонением измеряемого параметра.

Значение  $R$  определяется раздельно по номограммам, приведенным в приложении В, по заданным допускаемым значениям вероятностей ложного  $P_{\text{ло,р}}$  и необнаруженного  $P_{\text{но,р}}$  отказов (брак контроля), заданному допускаемому отклонению контролируемого параметра  $\delta_{\text{кп}}$  и заданному среднему квадратическому отклонению контролируемого параметра  $\sigma_{\text{тех}}$  и с учетом законов распределения отклонений контролируемых параметров и погрешностей измерений.

Определение значения  $R$  зависит от вида задания допускаемого отклонения контролируемого параметра и предусматривает несколько вариантов.

#### *Первый вариант*

Допускаемое отклонение измеряемого параметра двустороннее симметричное  $\pm \delta_{\text{кп}}$ . В этом случае, на ординату соответствующих номограмм откладывают значения  $P_{\text{ло,р}}$  и  $P_{\text{но,р}}$  и определяют точки пересечения с абсциссой  $|\delta_{\text{кп}}|/\sigma_{\text{тех}}$ . Кривые номограммы, на которых будут лежать соответствующие точки, дадут значения  $R_1$  и  $R_2$ , и меньшее из них принимается за искомое. Если точки пересечения не будут лежать на кривых, то  $R_1$  и  $R_2$  определяют методом интерполяции по значениям кривых, между которыми лежат эти точки. Значение  $\Delta_{\Sigma p}$  определяют по, приведенной выше, формуле.

#### *Второй вариант*

Допускаемое отклонение измеряемого параметра одностороннее  $+\delta_{\text{кп}}$  или  $-\delta_{\text{кп}}$ . В этом случае используют те же номограммы, что и в первом варианте, но так как при односторонних допусках, по сравнению с двусторонним симметричным, вероятности ложного и необнаруженного отказов будут в два раза меньшими, то на ординатах соответствующих номограмм откладывают значения  $2 \cdot P_{\text{ло,р}}$  и  $2 \cdot P_{\text{но,р}}$ . Дальнейшие расчеты выполняют так же, как и в первом варианте.

### *Третий вариант*

Допускаемое отклонение измеряемого параметра двустороннее несимметричное  $|+\delta_{\text{кп}}| \neq |-\delta_{\text{кп}}|$ . В этом варианте метод расчета основан на итерационном подходе с использованием тех же номограмм, что и для первого варианта. Определяют коэффициент асимметрии

$$K = |\delta_{\text{кп}}|_{\text{min}} / |\delta_{\text{кп}}|_{\text{max}}.$$

Затем вычисляют значения  $P'_{\text{ло,р}} = P_{\text{ло,р}} / K$  и  $P'_{\text{но,р}} = P_{\text{но,р}} / K$ .

После этого, в порядке, изложенном в первом варианте, определяют значения  $R'_1$  и  $R'_2$  соответствующие значению  $|\delta_{\text{кп}}|_{\text{min}} / \sigma_{\text{тех}}$ . Меньшее из полученных значений  $R'_1$  и  $R'_2$  принимают за исходное ( $R'$ ). Вычисляют значение  $R'' = K \cdot R'$ . По номограмме, по которой определяли  $R'$ , находят значение  $P''$ , соответствующее значению для  $|\delta_{\text{кп}}|_{\text{max}} / \sigma_{\text{тех}}$  и значение  $R''$ . Окончательное решение по определению  $R'$  и  $R''$  устанавливают по соотношению  $P' + P'' \approx 2 \cdot P$ .

Значение  $P$ , соответствующее исходному значению  $R'$ , выбирают из заданных значений  $P_{\text{ло,р}}$  и  $P_{\text{но,р}}$ . Если условие не выполняется, то при меньшем значении левой части соотношения  $P'$  увеличивается, а при большем значении – уменьшается и повторяются все операции до достижения условия  $P' + P'' \approx 2 \cdot P$ . Значения  $R'$  и  $R''$ , при которых соблюдается это условие, принимается за искомое для определения  $\Delta_{\Sigma\text{р}}$ .

Отсутствие полной информации для расчетов по определению  $\Delta_{\Sigma\text{р}}$  рассмотренными методами вызывает необходимость прибегнуть к вариантам упрощенных расчетов,

обуславливаемых различными случаями неполной исходной информации, связанными с определением значения коэффициента  $R$  при расчете допускаемого значения суммарной погрешности  $\Delta_{\Sigma}$ .

Типовыми случаями отсутствия полной информации при определении  $R$  являются следующие.

*Первый случай*

Заданы все исходные данные кроме среднего квадратического отклонения измеряемого параметра  $\sigma_{\text{тех}}$ . Значение  $R$  определяется по таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Значение коэффициента  $R$  при различных значениях вероятностей ложного и необнаруженного отказов

Отношения суммарной погрешности к допуску $R$	Вероятность ложного отказа $P_{\text{ло}}$ для законов распределений отклонений контролируемых параметров, %		Вероятность необнаруженного отказа $P_{\text{но}}$ для законов распределений отклонений контролируемых параметров, %	
	нормального	равновероятного	нормального	равновероятного
0,1	0,6	1,2	0,4	1,4
0,2	1,3	2,6	1,0	2,1
0,3	2,0	3,9	1,5	3,2
0,4	2,8	5,6	2,1	4,0
0,5	3,5	6,6	2,6	4,9
0,6	4,4	7,9	3,1	5,6
0,7	5,3	9,3	3,6	6,3
0,8	6,1	10,6	4,1	7,0
0,9	7,1	12,0	4,6	7,6
1,0	8,1	13,0	5,0	8,2

*Примечание* – Табличные значения  $P_{\text{ло}}$  и  $P_{\text{но}}$  указаны для нормального закона распределения погрешности измерения.

*Второй случай*

Не задан закон распределения отклонения измеряемого параметра. Значение  $R$  определяется по вышеприведенной таблице для равновероятного закона распределений отклонений измеряемых параметров.

*Примечание* - Первый и второй случаи упрощенных расчетов приводят к завышенным требованиям к точности выбираемых средств измерений.

*Третий случай*

Не заданы допускаемые значения вероятностей ложного и необнаруженного отказов или законы распределений отклонений измеряемых параметров. Закон распределения

погрешностей отличен от нормального или равновероятного или неизвестен. Значение  $R$  устанавливается в зависимости от важности измеряемого параметра из ряда 0,5; 0,4; 0,3; 0,25; 0,2; 0,15; 0,1.

Предпочтение следует отдавать значению коэффициента  $R$  равному 1/3, что обосновано критерием ничтожных погрешностей.

### 3.8. Метрологическая надежность средств измерений

В процессе эксплуатации любого средства измерений может возникнуть неисправность или поломка, называемые *отказом*. Внезапные отказы, вследствие их случайности, невозможно прогнозировать. Для средств измерений, состоящих из серийно выпускаемых в значительном объеме элементов (микросхем, резисторов, конденсаторов и пр.), можно подсчитать интенсивность отказов  $\lambda$  по таблицам средних статистических значений отказов отдельных элементов.

При отсутствии указанных данных *интенсивность отказов* ( $\lambda$ ) средств измерений - количество отказов определенного типа средств измерений в единицу времени, определяют экспериментально по результатам испытаний средств измерений на надежность. Для этого определенному количеству  $N$  однотипных средств измерений задают обычные режимы их работы и фиксируют число отказов  $l$  за определенный промежуток времени  $\Delta t$ . Интенсивность отказов средств измерений вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{l}{N \cdot \Delta t} .$$

*Вероятность безотказной работы* средства измерений – по формуле

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) \cdot dt\right),$$

а среднее время безотказной работы, называемое *наработкой на отказ*,

$$T_{\text{нд}} = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt .$$

Интенсивность отказов  $\lambda$ , вероятность безотказной работы  $P(t)$  и наработка на отказ  $T_{\text{ср}}$  называются *показателями надежности* средств измерений. Так как случайный отказ может произойти в любой момент независимо от того, сколько времени проработало данное средство измерений, интенсивность внезапных отказов не зависит от времени:

$$\lambda_{\Sigma}(t) = \lambda_{\Sigma} = \text{const} .$$

Поэтому при рассмотрении случайных отказов средств измерений вероятность их безотказной работы и наработку на отказ определяют, обычно, более простыми формулами:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} \cdot t} ,$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} .$$

По характеру своего проявления внезапные отказы являются *явными*. Они сравнительно легко обнаруживаются и, после выявления их причин, устраняются. Гораздо сложнее поддаются диагностированию так называемые *постепенные* отказы. Эти отказы заключаются в том, что с течением времени параметры средства измерений изменяются настолько, что его метрологические характеристики перестают соответствовать установленным для них нормам и средство измерений, вследствие этого, становится непригодным к применению по назначению. Такие отказы называются *скрытыми* и могут быть обнаружены только при очередной поверке или калибровке средства измерений. Поэтому интервалы между периодическими поверками (*межповерочные интервалы*) или

калибровками устанавливают исходя из требований *метрологической надежности* средств измерений.

**Метрологическая надежность** – это свойство средств измерений сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение определенного времени в рабочих условиях эксплуатации.

**Метрологическим отказом** называют выход метрологической характеристики средства измерений за пределы установленных норм.

Метрологические отказы являются следствием старения и износа элементов и узлов средства измерений. Поэтому интенсивность метрологических отказов возрастает с течением времени.

Межповерочный интервал средств измерений определяют по формуле:

$$T_{\text{МП}} = \frac{\ln(1 - P_{\text{М.ОТК}})}{\ln P_{\text{М}}(t)} \cdot t .$$

где:  $P_{\text{М}}(t)$  - вероятность безотказного метрологического функционирования;

$P_{\text{М.ОТК}}$  - вероятность метрологического отказа за время между поверками, выбираемая с учетом следующих положений, представленных в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Значения допускаемой вероятности метрологического отказа средств измерений

Для средств измерений, используемых	Значение допускаемой вероятности метрологического отказа
при технических измерениях	0,2 - 0,1
при передаче размеров единиц	0,15 - 0,05
при особо важных, ответственных измерениях	0,05 - 0,01

Стабильность во времени метрологических характеристик в значительной степени зависит от условий и интенсивности эксплуатации конкретных экземпляров средств измерений, Поэтому в процессе эксплуатации средств измерений может проводиться корректировка их межповерочного интервала.

Если в партии из  $N$  поверенных однотипных средств измерений  $m$  штук оказались забракованными по причине несоответствия их метрологических характеристик установленным нормам, то необходимость корректировки межповерочного интервала может быть определена по графикам, приведенным в приложении Г, полученным на основании обработки статистической информации.

Принятие решения о корректировке межповерочного интервала производится следующим образом:

- при нахождении точки с координатами  $(N, m)$  в области (А) межповерочный интервал уменьшают;
- при нахождении точки с указанными координатами в области (Б) - оставляют без изменения;
- при нахождении точки с координатами  $(N, m)$  в области (В) межповерочный интервал увеличивают.

Откорректированный межповерочный интервал определяют по следующей формуле:

$$T_{\text{МП}}^* = \frac{\ln(1 - P_{\text{М.ОТК}})}{\ln(1 - P_{\text{М.ОТК}}^*)} \cdot T_{\text{МП}},$$

где эмпирическая частота метрологических отказов

$$P_{\text{М.ОТК}}^* = \frac{m}{N} + 2 \cdot \sqrt{\frac{m}{N^2} \cdot \left(1 - \frac{m}{N}\right)} \cdot P$$

При  $m = 0$

$$P_{\text{М.ОТК}}^* = \frac{1}{2 \cdot (1 + N)}.$$

Межповерочные интервалы рекомендуется устанавливать либо в часах наработки, либо в календарных интервалах (в месяцах), используя следующий ряд чисел: 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12; 18; 24 и 36.

### **3.9. Методики выполнения измерений**

Практически любое измерение можно описать в виде некоторой совокупности правил и процедур, выполнение которых позволяет получить результат измерения с известной погрешностью. При этом в зависимости от вида и (или) объекта измерений процедуры измерений могут приобретать очень сложный характер, а их выполнение требовать не только соблюдения целого ряда условий, но и привлечения специалистов высокой квалификации.

В процессе подобных измерений для достижения требуемой точности их результата оператор должен не только учесть и, по возможности, исключить все значимые составляющие погрешности измерения, в том числе методическую погрешность, составляющие погрешности примененных средств измерений, ошибки самого оператора и пр., но и принять меры по минимизации влияния разнообразных факторов на объект измерений и провести соответствующую математическую обработку полученных опытных данных.

Для однозначного воспроизведения сложных, многофакторных измерений часто возникает необходимость четкой регламентации всей совокупности правил и процедур выполнения таких измерений специальным руководством – *методикой выполнения измерений* (МВИ). Применение таких методик позволяет обеспечить воспроизводимость и повторяемость подобных измерений при их выполнении разными людьми, обладающими соответствующей квалификацией, в различное время и на различных комплектах оборудования. МВИ, как правило, необходимы при измерениях, погрешность которых определяется не только погрешностью примененных средств измерений. Практически МВИ необходимо составлять для большинства косвенных измерений. Особенно велика роль МВИ при измерениях, связанных с определением состава веществ и материалов. В этой области

измерений МВИ в настоящее время являются порой основным инструментом.

Любая область измерений имеет свою специфику, обусловленную физической природой измеряемых величин, техническими особенностями используемых средств измерений, экспериментальных процедур. Специфическими особенностями определения состава веществ являются:

а) Крайне сложный доступ к измеряемой величине, например, массе некоторого компонента, находящегося, обычно, в анализируемом веществе в химической связи с другими элементами. Поэтому перед измерением массы определяемого компонента или отношения масс - массовой доли, необходимо провести, в большинстве случаев, сложные химико-аналитические процедуры по освобождению этого компонента от связи с матрицей вещества, в ходе которых возможно накопление значительных погрешностей. Эта сложность усугубляется огромным многообразием веществ, определяемых в них компонентов и возможных вариантов химических связей определяемых элементов.

б) Отсутствие эталонов для воспроизведения единиц величин, характеризующих состав вещества, поверочных схем, регламентирующих передачу их размеров.

в) Большое разнообразие химико-аналитических методик измерений, в которых переплетаются аналитические и измерительные процедуры, требующие высокой квалификации оператора, и от которых в значительной мере зависит правильность получаемых результатов.

г) Использование специфических приборов многофункционального назначения - хроматографов, спектрометров, квантометров и других анализаторов, не имеющих постоянных шкал и нуждающихся в индивидуальных градуировках, которые не обладают достаточной стабильностью во времени. Это требует периодической градуировки приборов по стандартным образцам или контрольным опытам.

Конечной целью обеспечения единства измерений в той или иной области сводится к достижению правильности результатов измерений и, в первую очередь, тех из них, которые относятся к категории технических - наиболее разнообразных и

многочисленных измерений, необходимых для обеспечения технологических процессов. Результаты таких измерений непосредственно используются для оценки качества продукции, учета материальных ценностей и т. д.

Требования к точности измерений при определении состава и свойств веществ и материалов обусловлено требованиями более полного использования сырьевых и материальных ресурсов, необходимостью повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции экономного расходования материальных и топливно-энергетических ресурсов и др. Значительные объемы измерений проводятся в системе наблюдений и охраны природной среды, в том числе при оценке деградации почвы, анализе водных ресурсов, анализе состояния биосферы, климата, здоровья людей и других, жизненно важных областях деятельности. Измерения состава веществ проводятся с применением химических и физических методов, требующих преобразования измерительной информации, что значительно затрудняет анализ погрешностей измерений и обеспечение их единства. В этом случае наличие методик выполнения измерений, обеспечивающих гарантированную погрешность результата измерений, является необходимым условием.

**Методика выполнения измерений** - совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с известной точностью.

Как правило, МВИ оформляют в виде документа, устанавливающего требования к совокупности операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленной погрешностью (далее - документ МВИ).

Документ МВИ должен иметь однозначное наименование и включать в себя область применения и разделы, в которых излагаются:

- требования к погрешности измерений или приписанные характеристики погрешности измерений;
- перечень средств измерений, вспомогательных устройств, материалов, растворов, химических реактивов и т.д., необходимых для реализации МВИ;
- метод (методы) измерений на которых основана МВИ;

- требования безопасности, охраны окружающей среды;
- требования к квалификации операторов;
- условия измерений;
- процедуры и операции по подготовке к выполнению измерений;
- процедуры и операции выполнения измерений;
- порядок и алгоритмы обработки (вычисления) результатов измерений;
- порядок и описание процедур оперативного контроля точности результатов измерений;
- правила оформления результатов измерений.

Поскольку МВИ является инструментом выполнения измерений, она, как и средство измерений, обладает совокупностью метрологических характеристик.

Определяющими метрологическими характеристиками МВИ являются:

- область применения, включающая в себя диапазон измерений;
- ограничивающие параметры влияющих факторов;
- погрешность измерений, состоящую, в общем виде из систематической и случайной составляющих погрешности.

МВИ может быть оформлена в виде самостоятельного документа или входить составной частью в другой документ (стандарт, технические условия, методика испытаний и пр.).

Содержание, построение, изложение, оформление методик выполнения измерений установлены межгосударственным стандартом ГОСТ 8.010-99 и подробно детализированы в национальных рекомендациях по метрологии О'z Т 51-088:1999.

## Глава 4

# ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ, ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА РАЗМЕРОВ ЕДИНИЦ ВЕЛИЧИН

### 4.1. Централизованное и децентрализованное воспроизведение единиц величин

Единство измерений можно обеспечить только в случае тождественности единиц, в которых проградуированы все средства измерений одной и той же величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения установленных единиц величин и передачи их размеров всем без исключения эксплуатируемым средствам измерений.

В соответствии с основным уравнением измерения (см. раздел 1.3), измерительная процедура сводится к сравнению неизвестного размера измеряемой величины с известным размером, в качестве которого используется размер соответствующей единицы.

Информация об единицах величин и их размерах содержится в Решениях Генеральных конференций по мерам и весам (ГКМВ), межгосударственных (ГОСТ 8.417:2002) и национальных (O'z DSt 8.012-2004) нормативных документах. Чем больше соответствие используемого для сравнения размера единицы величины с определением самой единицы этой величины, тем выше точность выражения в этих единицах значения измеряемой величины. Этим обстоятельством объясняются высокие требования к точности воспроизведения единиц величин, практическая реализация которых является важнейшим направлением метрологических работ во всех странах современного мира.

Размеры единиц величин могут воспроизводиться непосредственно на месте конкретного измерения, либо информация о размерах единиц должна передаваться по цепи метрологически соподчиненных (от более точных к менее точным) средств измерений от места централизованного

воспроизведения и хранения размеров этих единиц. В зависимости от этого различают *децентрализованное* и *централизованное воспроизведение единиц*.

Наглядным примером децентрализованного воспроизведения может служить воспроизведение единицы площади  $1 \text{ м}^2$ . Децентрализованно воспроизводятся единицы многих производных величин, но при этом информацию о размерах основных единиц получают от места их централизованного воспроизведения и хранения.

Централизованное воспроизведение единиц величин и передача их размеров представляет собой громоздкую, малоэффективную и весьма дорогостоящую систему, требующую значительных материально-технических и профессиональных ресурсов. Содержание и совершенствование этой системы представляет собой сложную организационно-техническую проблему.

Децентрализованное воспроизведение единиц величин экономически целесообразно и позволяет, в ряде случаев, более оперативно решать измерительные задачи, однако не всегда обеспечивает требуемую точность измерений. Современные достижения науки и технологий позволяют существенно расширить сферу децентрализованного воспроизведения единиц без потерь точности.

## 4.2. Эталоны

### 4.2.1. Основные понятия об эталонах

Централизованное воспроизведение и хранение единиц величин осуществляется специальными средствами измерений наивысшей (метрологической) точности, называемыми *эталоном* и являющимися высшим звеном метрологической цепи передачи размеров единиц.

**Эталон шкалы или единицы величины (эталон)** представляет собой средство измерений или комплекс средств измерений, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения шкалы или единицы величины с целью передачи ее размера метрологически соподчиненным средствам,

выполненные по особой спецификации и официально утвержденные в качестве эталона.

Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Из всех возможных способов осуществления эталона выбирают те, которые позволяют обеспечить наивысшую точность воспроизведения единицы.

Современный эталон должен обладать, по крайней мере, тремя тесно связанными друг с другом существенными признаками, сформулированными еще более полувека назад видным метрологом М.Ф. Маликовым – *неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.*

Под **неизменяемостью эталона** понимают его свойство поддерживать в течение неограниченного промежутка времени неизменным размер единицы, воспроизводимой им. Все изменения, обусловленные различными внешними условиями (температура, давление, гравитационное и иные поля и пр.) или внутренней структурой эталона, должны быть вполне определенными функциями величин, доступных измерению с необходимой точностью.

Требование неизменяемости эталона накладывает определенные условия на выбор его конструкции, структуры, материалов отдельных элементов, технологии изготовления, хранения и применения.

Необходимость обеспечения неизменяемости эталона привело в свое время к выдвижению принципа *естественности* воспроизведения единиц, т. е. к выбору в качестве единиц измерения «неизменных единиц», созданных самой природой. Так более двухсот лет назад была построена *метрическая система мер*, в которой в качестве «неизменной единицы» длины (*метр*) была выбрана одна десятимиллионная часть четверти длины (от полюса до экватора) земного меридиана, проходящего через Париж. Однако, являясь прогрессивной и в настоящее время, эта идея на момент ее появления не имела достаточной научной и технической базы и в полной мере становится реальной только в наши дни.

В качестве наглядного примера можно привести современное (естественное) определение единицы длины (см. раздел 1.4), в котором используется фундаментальная физическая постоянная (физическая константа) – скорость света в вакууме.

Под **воспроизводимостью эталона** понимают теоретическую возможность материализации единицы с помощью эталона без всякой, хотя бы очень малой, погрешности или, по крайней мере, с наименьшей погрешностью, возможной на данном уровне развития измерительной техники.

Воспроизводимость эталона обеспечивается путем устранения погрешностей различными приемами в процессе его изготовления и путем всестороннего изучения свойств эталона, проводимого с целью определения погрешностей, допущенных при изготовлении эталона, также появляющихся в процессе его эксплуатации, и введения соответствующих поправок.

Под **сличаемостью эталона** понимают возможность обеспечить наибольшую возможную точность процессам сличения этого эталона с другими средствами измерений. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений. В процессе сличения свойства эталонов не должны претерпевать изменения и сами эталоны не должны влиять на параметры сличаемых с ними средств.

Для выполнения перечисленных требований воспроизведение единиц на эталонных установках проводят по особым строго регламентированным спецификациям, как правило, согласованным между различными странами.

#### 4.2.2. Метрологическая классификация эталонов

В зависимости от конструктивного выполнения и состава эталоны подразделяют на *эталонные комплексы, одиночные эталоны, групповые эталоны, эталонные наборы*.

**Эталонный комплекс** представляет собой совокупность различных по назначению средств измерений и вспомогательного оборудования, предназначенную для

воспроизведения, хранения единицы физической величины и передачи ее размера.

Примером эталонного комплекса может служить эталон времени и частоты, состоящий из цезиевых генераторов (предназначенных для воспроизведения единиц времени и частоты), водородных генераторов (используемых для хранения единиц времени и частоты и выполняющих функции хранителей шкалы времени при их непрерывной работе), группы квантово-механических часов (предназначенных для хранения шкалы времени). В состав эталонного комплекса входит также аппаратура для внутреннего и внешнего сличения частот и средства жизнеобеспечения всего этого комплекса.

**Одиночный эталон** состоит из одной меры (измерительного прибора, установки), обеспечивающих воспроизведение и хранение единицы величины самостоятельно без участия других средств измерений этого же вида.

Наглядным примером одиночного эталона является эталон единицы массы – килограмма, осуществляемый в виде платино-иридиевой гири (в некоторых эталонах – стальной гири).

**Групповой эталон** состоит из совокупности однотипных мер (или других средств измерений), применяемых как одно целое для повышения надежности хранения единицы.

Размер единицы, хранимой групповым эталоном, определяется как среднее арифметическое из значений, воспроизводимых отдельными мерами или иными средствами измерений, входящими в состав группового эталона.

Примером группового эталона может служить эталон единицы электрического напряжения – вольта, представляющего собой группу из 20 одинаковых мер э. д. с. - нормальных элементов (элементов Вестона).

Групповые эталоны могут быть *постоянного* и *переменного* составов.

В эталонах постоянного состава десятилетиями используются одни и те же экземпляры средств измерений.

Например, эталон единицы электрического сопротивления – ома, состоящий из 10 манганиновых герметизированных измерительных катушек электрического сопротивления.

В групповые эталоны переменного состава входят средства измерений, периодически заменяемые новыми.

Примером такого эталона является уже описанный групповой эталон единицы электрического напряжения и электродвижущей силы постоянного тока.

Эталонный набор представляет собой набор мер или измерительных приборов, позволяющих хранить единицу или измерять величину в определенном диапазоне, в котором отдельные меры или измерительные приборы, входящие в эталон, имеют различные номинальные значения или поддиапазоны значений величины.

В качестве примера эталонного набора можно привести эталон единицы плотности жидкостей в виде набора денсиметров, служащих для определения плотности жидкостей в различных участках общего диапазона измерений.

Эталонные наборы, как и групповые эталоны, могут быть постоянного и переменного составов.

В соответствии с классом воспроизводимых единиц величин различают эталоны *основных* и *производных* единиц.

В принципе, для обеспечения единства измерений достаточно централизовано, с помощью эталонов, воспроизводить только основные единицы. Размеры производных единиц могут быть получены на местах путем косвенных измерений при строгом соблюдении требований спецификаций. Однако, для повышения общего уровня точности измерений, необходимого для современных технологий, и повышения оперативности передачи размеров единиц широко используются воспроизведение с помощью эталонов и производных единиц.

По уровню точности воспроизведения единиц и метрологической соподчиненности эталоны подразделяют на *первичные*, *вторичные* и *рабочие*.

**Первичный эталон** – эталон, осуществляющий воспроизведение и хранение единицы с наивысшей точностью, достижимой в данной области измерений, размер единицы воспроизводимой которым устанавливается независимо от других эталонов этой же величины.

Первичные эталоны основных единиц воспроизводят единицу в соответствии с ее определением.

Примером первичного эталона является эталон единицы длины – метр, представляющий собой комплекс средств измерений, осуществляющий воспроизведение единицы как путь, проходимый светом в вакууме за интервал времени равный  $1/299\,792\,458$  с.

В тех случаях, когда одним первичным эталоном технически нецелесообразно обслуживать весь необходимый для практики диапазон измеряемой величины, создаются несколько первичных эталонов, охватывающих части этого диапазона, с таким расчетом, чтобы был охвачен весь диапазон. В этом случае проводится согласование размеров единиц, воспроизводимых «соседними», по диапазону воспроизводимых величин, первичными эталонами.

Примером такой «цепи» эталонов являются взаимосогласованные эталоны единицы термодинамической температуры, каждый из которых воспроизводит единицу в определенном интервале значений температуры.

Разновидностью первичных эталонов являются *специальные эталоны*.

**Специальный эталон** – эталон, предназначенный для воспроизведения единицы в особых условиях и заменяющий в этих условиях первичный эталон.

Специальные эталоны создают для воспроизведения единицы в особых условиях (сверхнизкие, высокие и сверхвысокие частоты, энергии, температуры, давления, особые состояния веществ, крайние участки диапазонов измерений и т. п.), в которых прямая передача размера единицы от существующих первичных эталонов технически не осуществима с требуемой точностью.

Примером специального эталона является эталон силы электрического переменного тока 0,04 - 300 А в диапазоне частот 0,1 - 300 МГц.

*Примечание - В настоящее время в метрологической практике многих государств постепенно отходят от применения термина «специальный эталон» и для вновь утверждаемых эталонов этот термин не используют.*

**Вторичный эталон** – эталон, размер единицы которого устанавливают по первичному эталону этой же единицы.

Вторичные эталоны создаются в тех случаях, когда это необходимо для рациональной организации поверочных работ и для обеспечения сохранности и наименьшего износа первичного эталона.

По своему метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на *эталон-копии*, *эталон-сравнения*, *эталон-свидетели*.

**Эталон-копия** – вторичный эталон, предназначенный для хранения единицы и передачи ее размера рабочим эталонам.

Эталон-копия представляет собой метрологическую копию первичного эталона и не обязательно является его физической копией. Примером может служить эталон-копия единицы длины – метра, представляющий собой специальным образом выполненную и хранимую штриховую меру длины.

**Эталон сравнения** – вторичный эталон, предназначенный для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы между собой.

Примером эталона сравнения является возимая высокостабильная электронная (так называемая – «твердотельная») мера электрического напряжения постоянного тока, используемая для взаимного сличения между собой эталонов единицы электрического напряжения разных стран.

**Эталон-свидетель** – вторичный эталон, применяемый для проверки сохранности первичного эталона и для замены его в случае порчи или утраты. Эталон-свидетель применяется лишь тогда, когда первичный эталон является невоспроизводимым.

В настоящее время, среди эталонов основных единиц Международной системы СИ, эталон-свидетель существует только для соблюдения сохранности первичного эталона единицы массы – килограмма, которая воспроизводится, как известно, с помощью прототипа, не имеющего своего естественного воплощения в природе.

**Рабочий эталон** – эталон, предназначенный для хранения единицы и передачи ее размера другим средствами измерений более низкой точности.

Размер единицы рабочего эталона устанавливают по вторичному эталону-копии или, в некоторых случаях, непосредственно по первичному эталону.

В состав эталонов включают не только непосредственно сами эталоны - средства измерений высочайшей точности, осуществляющие воспроизведение и хранение единицы величины, но и средства измерений, необходимые для передачи размера единицы от эталона другим средствам измерений, контроля условий измерений и наблюдения за неизменностью размера единицы величины хранимой эталоном.

При необходимости в состав эталонов включают другие технические средства, обеспечивающие работу эталонов (например, информационно-вычислительные комплексы, специальные платформы, сооружения, выполненные по особой спецификации помещения и т. д.).

Описанную выше взаимную метрологическую соподчиненность эталонов можно представить в виде схемы, указанной на рис. 4.1.

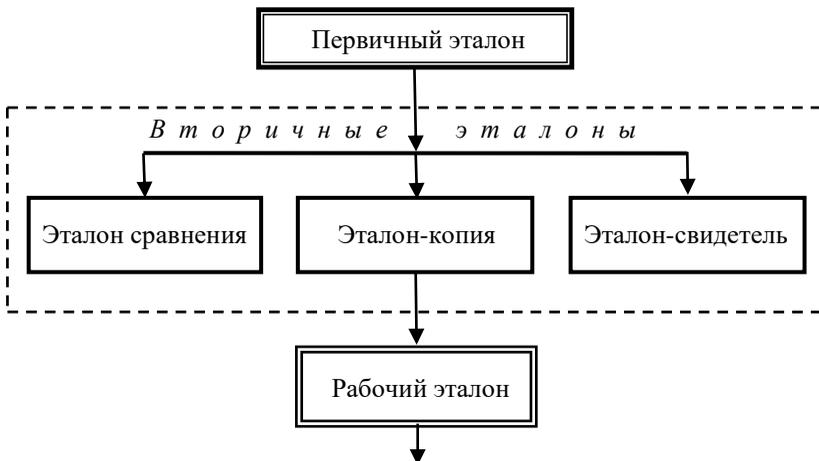


Рис. 4.1 Метрологическая структура эталонов

Метрологические характеристики эталонов выражают в соответствии с ГОСТ 8.381:2006. Обычно для эталонов указывают оценку случайной погрешности воспроизведения

единицы, выраженную средним квадратическим отклонением результата измерений, и оценку неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы.

В настоящее время обязательным требованием стало установление для эталонов неопределенности измерений, выполненных с их помощью, в соответствии с межгосударственными рекомендациями РМГ 43:2001.

#### **4.2.3. Законодательная классификация эталонов**

Эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами из имеющихся эталонов в данном виде измерений (например, в стране или группе стран, в регионе, в ведомстве или предприятии), от которого получают размер единицы все метрологически подчиненные ему средства измерений, называют *исходным эталоном*.

Эталоны, официально утвержденные в качестве исходных эталонов на территории государства, называют *национальными (государственными) эталонами*.

Порядок разработки, аттестации, утверждения, регистрации, хранения и применения в Узбекистане национальных эталонов установлен государственным стандартом Узбекистана O‘z DSt 8.014:2002.

Основные положения по эталонам установлены межгосударственным стандартом ГОСТ 8.057:2006.

Национальные эталоны используют для воспроизведения и хранения основных и важнейших производных единиц величин, средства измерений которых широко применяются в законодательно регулируемой государством сфере.

Техническая инфраструктура эталонов, специальные здания, сооружения, оборудование, без которых невозможно функционирование эталонов, является неотъемлемой частью эталонных имущественных комплексов, состав которых фиксируется в документации на эталоны.

Национальные эталоны являются объектами стратегической значимости и исключительной собственностью государства и не подлежат отчуждению (купле, продаже).

Значимость национальных эталонов обусловлена их ролью в обеспечении единства измерений, а также невозможностью в большинстве случаев точного копирования, тиражирования и восстановления первичных эталонов в случае их утраты. Значимость эталонов резко возрастает по мере изучения и совершенствования их свойств в результате постоянных метрологических исследований и международных сличений.

Научно-технический уровень национальных эталонов является показателем научного и технологического потенциала государства и должен быть достаточным для обеспечения технической и экономической независимости страны и реализации ее стратегических целей, в том числе в области национальной безопасности.

Наряду с национальными эталонами на пространстве СНГ существуют и *межгосударственные эталоны* – эталоны, признанные в установленном порядке в качестве исходных для государств-участников Соглашения «О проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации» (см. введение).

Межгосударственный эталон может представлять собой эталон, состоящий из национальных (государственных) эталонов двух и более государств-участников Соглашения.

Положение о межгосударственных эталонах установлено межгосударственными правилами ПМГ 35:2001.

Для обеспечения единства измерений в глобальном масштабе осуществляют и применяют *международные эталоны*, хранимые в Международном бюро мер и весов (МБМВ, пригород Парижа – Севр, Франция) – первого в мире международного метрологического института, осуществляющего свою деятельность на ежегодные отчисления государств, подписавших международную Метрическую конвенцию.

Внешний вид старейшего международного эталона единицы массы – *килограмм*, являющегося международным прототипом килограмма, приведен на рис. 4.2.

Прототип, утвержденный в 1889 г. первой Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ), представляет собой гирию из платино-иридиевого сплава (90 % Pt, 10 % Ir),

выполненную в виде прямого цилиндра с закругленными ребрами, диаметр и высота которого составляют 39 мм.

Копия международного прототипа № 12, выполненная из той же, что и международный прототип, плавки платино-иридиевого сплава, хранящаяся и применяемая во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ, г. Санкт-Петербург), является в настоящее время государственным первичным эталоном единицы массы Российской Федерации и, одновременно, межгосударственным (СНГ) эталоном.



Рис. 4.2. Международный прототип единицы массы

#### 4.2.4. Хранение, применение и сличение эталонов

Метрологические свойства эталонов исследуют в течение всего срока службы с целью подтверждения неизменности их паспортных характеристик и поиска путей повышения точности воспроизведения и хранения единиц и передачи их размеров.

Совокупность операций, необходимых для поддержания метрологических характеристик эталона в установленных пределах называют *хранением эталона*.

Хранение эталонов представляет собой кропотливую каждодневную метрологическую деятельность, которую осуществляют высококвалифицированные специалисты данной области измерений составляющие специальную категорию должностных лиц – *ученых хранителей эталонов*.

Ученых хранителей национальных эталонов назначает Национальный орган по метрологии (в Узбекистане – Агентство «Узстандарт»).

Эталоны хранят и применяют в специализированных центрах государственной метрологической службы. Рабочие эталоны могут храниться также в метрологических службах ведомств и службах юридических лиц в соответствии с их специализацией и установленными правилами.

Национальные эталоны, образующие в своей совокупности *эталонную базу страны*, хранят и применяют государственные научные метрологические организации. В Узбекистане такой организацией является Центр национальных эталонов Республики Узбекистан Агентства «Узстандарт».

Число эталонов, составляющих эталонную базу, не является постоянными, а изменяется в зависимости от потребностей национальной экономики. Обычно прослеживается увеличение их числа, что обусловлено постоянным развитием и расширением парка эксплуатируемых средств измерений.

Глобализация экономики и широкое развитие экономической, торговой и технологической интеграции стран мирового сообщества определяют необходимость проведения работ по обеспечению единства измерений в глобальном масштабе, поскольку достоверная измерительная информация является доказательной основой взаимного признания результатов испытаний и всей инфраструктуры оценки и подтверждения соответствия продукции и услуг. Это, в свою очередь, налагает жесткие требования по постоянному и обязательному поддержанию согласованности размеров единиц величин, воспроизводимых эталонами разных стран. Для обеспечения этих требований национальные эталоны подлежат *сличению* с международными и (или) межгосударственными эталонами и, если это необходимо, с национальными эталонами других стран.

**Сличение эталонов** – совокупность операций, устанавливающих соотношение между размерами величины, полученными в результате воспроизведения величины или ее производных эталонами стран-участниц сличений.

Сличению подвергаются национальные (государственные) эталоны, предназначенные для воспроизведения, хранения и (или) передачи размера физической величины, ее кратных или дольных значений.

Решение о необходимости проведения сличения принимает государство-владелец эталона с учетом рекомендаций международных и (или) региональных организаций по метрологии.

Сличения являются обязательной составной частью работ по исследованию национального эталона и определению размера воспроизводимой им единицы, предпочтительно Международной системы единиц.

Сличению, как правило, подлежат эталоны одинакового уровня точности.

Сличения эталонов осуществляют посредством транспортируемого эталона сравнения, а в случае его отсутствия выбирается средство сличений по согласию государств-участников сличений. Эталон сравнения (средство сличений) должен удовлетворять требованиям стабильности.

Сличения эталонов могут быть *круговыми*, *радиальными* или *комбинированными*. Выбор вида сличения (круговые или радиальные) проводят в зависимости от стабильности эталона сравнения (средства сличений).

В зависимости от количества стран-участниц сличений сличения подразделяют на *двусторонние* и *многосторонние*.

Распространенными видами многосторонних сличений являются *международные* и *региональные* сличения.

Международные сличения эталонов, проводятся под эгидой Консультативных комитетов (КК) Международного комитета по мерам и весам (МКМВ) и региональных метрологических организаций. Они являются юридической основой признания *эквивалентности сличаемых эталонов* и, соответственно, правильности измерений и сертификационных испытаний в странах - участницах сличений.

Под **эквивалентностью эталонов** понимают равенство эталонов для практических целей по их значению или значимости.

Одно из ряда сличений, выбранное Консультативным комитетом для проверки основных методов в данной области называют *ключевым*.

Различают два основных типа ключевых сличений.

В первый тип входят сличения эталонов, у которых предполагается, длительная стабильность (типичными для них являются эталоны на основе квантовых эффектов). Во вторую категорию входят сличения тех эталонов, для которых нельзя предположить долгосрочную стабильность. Методики проведения сличений и, в некоторых случаях, оценки результатов, в двух этих случаях могут отличаться.

Сличения эталонов на основе квантовых эффектов и других стабильных эталонов обычно проводятся в двустороннем порядке и на постоянной основе. Национальные эталоны сличаются с одним конкретным эталоном как это удобно участвующей лаборатории. Типичными для этих сличений являются сличения частот, воспроизводимых квантовыми оптическими генераторами (лазерами), сличения эталонов электрического напряжения постоянного тока, выполненных с использованием эффекта Джозефсона и эталонов электрического сопротивления на основе квантового эффекта Холла, проводимые МБМВ. Типичными сличениями других стабильных эталонов, но с гораздо большими неопределенностями, можно считать проводимые МБМВ сличения эталонов единиц в области дозиметрии ионизирующих излучений. Методики, используемые в МБМВ для проведения сличений этого типа, описаны в документе «Методики, используемые в ключевых сличениях МБМВ».

Другие сличения, в которых не предполагается, что эталоны имеют длительную стабильность и которые составляют большинство ключевых сличений, проводятся по четкому временному графику. Это позволяет всем участвующим лабораториям, проводить свои измерения за установленный период времени. Эти сличения требуют, чтобы

транспортируемые эталоны имели хорошую долгосрочную стабильность и стабильность во время транспортировки.

Результаты ключевых сличений позволяют судить об эквивалентности эталонов. Эквивалентность эталонов не подразумевает их идентичность. Степень эквивалентности двух национальных эталонов – это степень, с которой два национальных эталона метрологических институтов совпадают друг с другом по значению единицы, воспроизводимой эталоном. Она выражается как разница их соответствующих значений от опорного значения ключевого сличения и имеет соответствующую неопределенность.

Для каждого ключевого сличения назначается ведущая (пилотная) лаборатория (национальный метрологический институт – хранитель эталонов), которая берет на себя основную ответственность за проведение сличения. При составлении списка участников и графика сличения КК следит за тем, чтобы число участников от каждой из основных региональных метрологических организаций было достаточным для обеспечения достоверной связи между соответствующими региональными сличениями и сличением, проводимым консультативным комитетом.

Результаты ключевых сличений, проводимых консультативными комитетами, МБМВ и региональными метрологическими организациями, оцененные в установленном порядке и утвержденные консультативными комитетами являются основанием для взаимного признания национальных эталонов.

В октябре 1999 г. в Париже под эгидой Международного комитета мер и весов (МКМВ) и МБМВ руководители национальных метрологических институтов – хранителей эталонов (НМИ) 38-ми государств – членов Метрической конвенции подписали Соглашение о взаимном признании национальных эталонов, сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых НМИ (далее Соглашение). К концу 2005 года к Соглашению присоединились еще 25 НМИ из разных стран.

Основными целями Соглашения являются:

- установление степени эквивалентности национальных эталонов, т. е. степени, с которой эти эталоны согласуются с

опорными значениями, определяемыми в ходе ключевых сличений, и следовательно, согласуются друг с другом;

- взаимное признание сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых НМИ;

- обеспечение правительств и других административных органов надежной технической базой для более широких договоренностей, касающихся международной торговли, научно-технического сотрудничества и разработки нормативной документации.

Результат участия НМИ в Соглашении – опубликование сведений о его калибровочных и измерительных возможностях, которые определяются как «наивысший уровень измерения или калибровки, обычно предлагаемый клиентам, выраженный в значениях доверительного уровня, равного 95 %», в базе данных, поддерживаемой МБМВ и общедоступной через сеть Интернет. Иными словами, путем опубликования всесторонне проверенных данных о метрологическом состоянии своих эталонов НМИ заявляет список метрологических услуг, подтверждаемых выдачей соответствующих сертификатов, которые признаются всеми участниками Соглашения.

Для обеспечения объективной основы взаимного признания результатов метрологической деятельности, проводимой в отдельных странах, Соглашение требует выполнения следующих условий:

- наличие результатов ряда ключевых сличений, проводимых по четко установленным методикам, которые ведут к количественному выражению степени эквивалентности национальных эталонов;

- функционирования соответствующей системы обеспечения качества в каждом НМИ, гарантирующей стабильность деятельности НМИ;

- успешного участия каждого НМИ в дополнительных сличениях, проводимых с целью удовлетворения специфических потребностей, не охватываемых ключевыми сличениями, включая сличения для поддержки доверия к сертификатам калибровки.

Координацию сотрудничества Соглашение возлагает на МБМВ. Ответственность за ключевые и дополнительные

сличения ложиться на консультативные комитеты МКМВ, региональные метрологические организации (РМО) и МБМВ.

Анализ и публикацию данных по калибровочным и измерительным возможностям (calibration and measurement capabilities - СМС), которые декларируются НМИ, осуществляет Объединенный комитет РМО и МБМВ. Вся информация, относящаяся к выполнению Соглашения, содержится в приложениях, хранящихся на Web-сайте МБМВ – [www.bipm.org](http://www.bipm.org) (там же опубликован текст Соглашения на французском и английском языках).

Периодичность сличения эталонов устанавливается в зависимости от стабильности значений величин, воспроизводимых эталонами, точности эталонов, принципами воспроизведения единиц, заложенными в эталоны, и ряда других технических и экономических факторов.

Например, эталоны единиц массы и длины сличают раз в 15 – 25 лет, эталоны ряда электрических и световых единиц – раз в 3 – 5 лет. Международный прототип единицы массы (рис. 4.2.) используют, со строгим соблюдением специфицированных на международном уровне правил, для передачи размера воспроизводимой им единицы вторичному эталону-копии один раз в 25 лет. Не смотря на исключительно высокую точность современных эталонов времени и частоты (относительная погрешность воспроизведения единицы порядка  $10^{-13}$ ) международные сличения таких эталонов проводят постоянно с использованием специальных каналов спутниковой связи. Это необходимо для поддержания на высоком уровне точности всемирной шкалы времени.

### 4.3. Квантовая метрология

Принцип «естественности» единиц величин - мера должна иметь свое отражение в природе, что гарантирует неизменность и фундаментальность меры и ее независимость от человека, выдвинутый более двухсот лет назад, продолжает быть актуальным и в наши дни. Но только в настоящее время, с использованием достижений современной науки и технологий, этот принцип начинает приобретать материальное воплощение.

В начале XX века немецкий физик Макс Планк предложил установить основные единицы системы единиц величин, пригодной для всей Вселенной, на основании фундаментальных физических констант – скорости света  $c_0$ , постоянной Планка  $h$  (или  $\hbar = h/2\pi$ ) и гравитационной постоянной  $\gamma$ .

Эти константы представляют собой коэффициенты в уравнениях основных физических теорий – классической и квантовой электродинамики и общей теории относительности – и их значения являются максимально стабильными и не зависящими от внешних условий, а единицы, установленные на их основе, идеально соответствуют принципу естественности. Однако, предложенные Планком единицы длины, времени и массы, чрезвычайно малы по сравнению с используемыми на практике единицами этих величин. Кроме того, еще не известны реальные физические процессы, в которых планковские единицы могли бы быть воспроизведены. Поэтому, несмотря на их универсальность и естественность, эти единицы в метрологии до настоящего времени еще не используются.

Реальная возможность создания универсальной системы естественных мер появилась после открытия *макроскопических квантовых эффектов*, таких как сверхпроводимость, сверхтекучесть, квантовый эффект Холла и ряд других. В соответствии с этими эффектами в результате когерентного (согласованного во времени) поведения огромного количества микрочастиц происходит квантование строго определенными порциями той или иной макроскопической величины.

Одним из таких эффектов является эффект протекания сверхпроводящего тока через тонкий, порядка 10 ангстрем ( $\sim 10^{-9}$  м), слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника, предсказанный в 1962 г. Брайаном Джозефсоном. Этот эффект тесно связан с другим эффектом, предсказанным в 1956 г. Леоном Купером, состоящим в объединении (при достаточно низких температурах) свободных электронов в металле в пары (куперовские пары) в результате их притяжения, вызванного колебаниями ионов кристаллической решетки, что приводит к появлению сверхпроводимости.

Куперовские пары могут просачиваться (туннелировать) через тонкий слой диэлектрика из одного сверхпроводника в

другой. Если, при этом, волновые функции пар в двух сверхпроводниках окажутся различными, то через переход Джозефсона, схема которого приведена на рис. 4.3., будет протекать ток в отсутствие приложенной к переходу разности потенциалов.

Описанное явление получило название *стационарного эффекта Джозефсона*.

Если к переходу Джозефсона приложить разность потенциалов  $U$ , то при туннелировании куперовской пары из одного сверхпроводника в другой избыток ее энергии  $2 \cdot e \cdot U$  будет излучаться в виде кванта света – фотона. Частота  $\nu_0$  этого кванта определяется законом сохранения энергии:

$$h \cdot \nu_0 = 2 \cdot e \cdot U.$$

Подобное явление называют *нестационарным эффектом Джозефсона*.

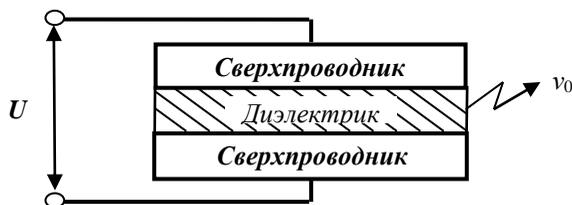
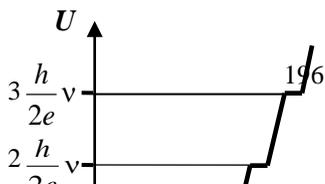


Рис. 4.3. Схема перехода Джозефсона

Если же облучать переход Джозефсона излучением с частотой  $\nu$ , то при совпадении этой частоты с характерной для данного напряжения  $U$  частотой  $\nu_0$  возникнет резонансное взаимодействие.

Такой же резонанс возникает и при  $\nu = \nu_0 / n$ , где  $n$  – любое целое число, в результате чего на вольт-амперной характеристике перехода Джозефсона (рис. 4.4.) появляются «ступеньки» - достаточно протяженные участки неизменного напряжения  $U$ , соответствующие изменяющемуся в определенных пределах току  $I$  через переход.



$$U = n \cdot \frac{h}{2 \cdot e} \cdot v.$$

Рис. 4.4. Вольтамперная характеристика перехода Джозефсона

Заряд электрона  $e$  является такой же фундаментальной константой, как и упоминавшиеся ранее  $h$ ,  $c_0$ ,  $\gamma$ . Величина  $h/2 \cdot e$  называется *квантом магнитного потока*, значение которого определяется в настоящее время с гораздо большей точностью, чем значения  $h$  и  $e$  по отдельности.

Квант магнитного потока может быть определен без использования производных единиц электрических величин на основе уравнений связи между фундаментальными физическими константами, значения которых определяют через основные единицы международной системы единиц СИ.

$$\frac{h}{2 \cdot e} = \frac{c_0}{4} \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \frac{m_e}{m_p} \cdot \frac{M_p}{N} \cdot \frac{\alpha}{R_\infty}},$$

- где  $c_0$  - скорость света в вакууме,  $m \cdot s^{-1}$ ;  
 $\mu_0$  - магнитная постоянная вакуума,  $m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$ ;  
 $m_e$  - масса покоя электрона,  $kg$ ;  
 $m_p$  - масса покоя протона,  $kg$ ;  
 $M_p$  - атомная масса протона (в атомных единицах массы);  
 $N$  - постоянная Авогадро,  $mol$ ;  
 $\alpha$  - постоянная тонкой структуры (безразмерная величина);  
 $R_\infty$  - постоянная Ридберга,  $m^{-1}$ .

Учитывая высочайшую точность измерения в настоящее время частоты, точность воспроизведения электрического напряжения постоянного тока с помощью эффекта Джозефсона ограничивается только точностью значения  $h/2 \cdot e$  (стандартное отклонение при воспроизведении напряжения составляет порядка  $10^{-8}$  V).

В настоящее время на использовании эффекта Джозефсона основаны эталоны единицы напряжения – вольта во всех развитых странах. В этих эталонах дискретный переход Джозефсона, находящийся в специальном экранированном криостате при температуре жидкого гелия ( $T = 4,2$  K), возбуждается сверхвысокочастотным излучением с частотой 8 ... 12 GHz, при этом значение квантованного напряжения составляет 4 ... 10 mV. Столь низкое значение воспроизводимого напряжения вызвало необходимость создания специальных интегральных микросхем, включающих в себя порядка 1000 и более переходов Джозефсона, что позволяет воспроизводить напряжения на уровне 1 V и выше. Параллельно проводятся исследования по созданию так называемых высокотемпературных переходов Джозефсона, позволяющих воспроизводить единицу напряжения при температуре жидкого азота. Это позволит существенно расширить сферу децентрализованного воспроизведения единицы напряжения.

Результаты современных исследований позволяют надеяться, что стабильность эталонов на основе эффекта Джозефсона может достигать порядка  $10^{16}$ , что открывает широкие возможности для совершенствования естественного эталона вольта.

Другим, интересным с метрологической точки зрения, макроскопическим квантовым эффектом является *квантовый эффект Холла*, открытый в 1980 г. Клаусом фон Клитцингом.

В *классическом эффекте Холла* на боковых гранях пластины с током  $I$ , помещенной в магнитное поле с индукцией  $B$ , возникает разность потенциалов  $U_H$ , значение которой прямо пропорционально току в пластине, магнитной индукции поля и обратно пропорционально плотности электронов. Эффект характеризуется так называемым сопротивлением Холла  $R_H =$

$U_H / I$ . Это явление объясняется тем, что под действием магнитного поля электроны, движущиеся в электропроводящей пластине, изгибают свои траектории и накапливаются на ее боковых гранях.

Совершенно иная ситуация возникнет если движение электронов происходит в сверх тонком, двухмерном, проводящем слое, находящемся в сильном магнитном поле, перпендикулярном плоскости этого слоя. В этом случае энергия движения электронов в плоскости слоя, в соответствии с законами квантовой механики, может принимать только дискретные значения

$$E_n = \left( n + \frac{1}{2} \right) \cdot h \cdot e \cdot \frac{B}{m_e} \cdot c_0, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots .$$

Сопротивление Холла в этом случае может иметь строго фиксированные дискретные значения, определяемые следующим выражением:

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{h}{e^2 \cdot n} = \frac{\mu_0 \cdot c_0}{2 \cdot n \cdot \alpha}, \text{ в свою очередь}$$

$$\alpha = \mu_0 \cdot c_0 \cdot \frac{e^2}{2 \cdot h},$$

где  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры.

Дискретный характер энергии движения электронов приводит к наличию плоских участков с квантованными значениями сопротивления Холла ( $R_H$ ) на зависимости  $R_H$  от плотности электронов в двухмерном проводящем слое  $\rho_e$ , приведенной на рис. 4.5.а.

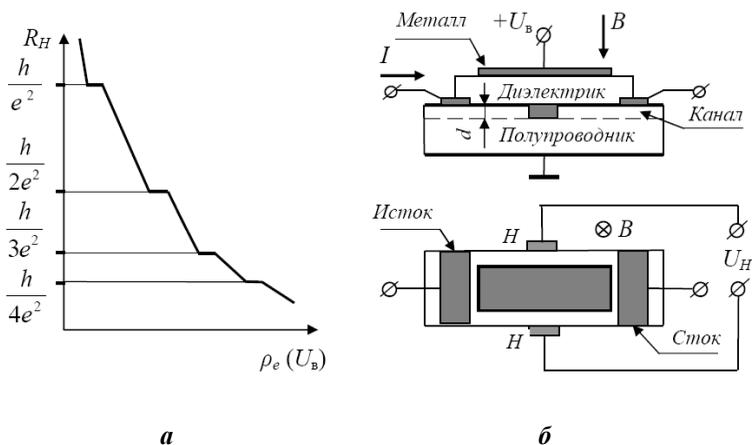


Рис. 4.5. Зависимость сопротивления Холла от плотности электронов в проводящем слое (а) и холловская МОП структура (б)

Описанный квантовый эффект наблюдается при низких температурах в специальной, так называемой, МОП структуре - металл – окись (диэлектрик) – полупроводник, помещенной в сильное магнитное поле с индукцией  $B$ , перпендикулярное плоскости структуры. Подобная холловская МОП структура схематически показана на рис. 4.5.б.

При подаче на металлическую пластину положительного потенциала  $(+U_B)$  часть электронов из кремниевого полупроводника подтянется к границе диэлектрика (окись кремния  $\text{SiO}_2$ ) и окажется заключенной в тонком слое – канале, ограниченном на рис. 4.5.б пунктиром. Вернуться в полупроводник электронам не дает притяжение к металлической пластине, созданное напряжением  $U_B$ , а диэлектрик для электронов непроницаем. Запертые в канале толщиной  $d$  электроны, в соответствии с законами квантовой механики, будут занимать самый низший из возможных дискретных энергетических уровней, соответствующих движению поперек слоя, а их волновые функции будут как бы размазаны по толщине канала. Такие электроны различаются между собой

величиной и направлением импульса в плоскости канала, и слой электронов окажется как бы двухмерным.

Изменяя напряжение  $U_v$  регулируют плотность электронов  $\rho_e$  в проводящем слое – канале, и таким образом устанавливают необходимое квантованное значение сопротивления Холла.

Отличительной особенностью квантового эффекта Холла является независимость холловского сопротивления от тока в проводящем канале МОП структуры и от изменения индукции магнитного поля. Кроме этого, холловское сопротивление оказывается нечувствительным, в определенных пределах, от наличия примесей в полупроводнике.

Сопротивление Холла в структуре рис. 4.5.б, например, при  $n = 4$  составляет  $6453,2 \Omega$  и имеет воспроизводимость порядка  $10^{-8}$ .

В настоящее время ведущие национальные метрологические институты стран мира осуществляют воспроизведение единицы электрического сопротивления с использованием квантового эффекта Холла.

В конце XX века японскими физиками открыт новый макроскопический квантовый эффект, возникающий на джозефсоновском переходе малой емкости или на гранулярной сверхпроводящей пленке, в которой образуется решетка таких переходов. Облучение подобной структуры электромагнитными колебаниями с частотой  $\nu$  приводит к появлению резонансных пиков на его вольтамперной характеристики. Это означает, что прохождение через образец постоянного тока имеет квантовый характер, согласно следующему соотношению:

$$I = 2 \cdot e \cdot \frac{k}{n} \cdot \nu,$$

где  $k$  и  $n$  – целые числа.

После детальной проработки этого квантового эффекта, вероятно, будет получена возможность создания эталона силы тока.

Использование в метрологических целях макроскопических квантовых эффектов позволяет создать *подлинно естественные эталоны*. При выполнении определенных условий, которые

можно строго фиксировать (тип и качество структуры, температура, магнитное поле и т. д.) такие эталоны позволяют с высокой точностью воспроизводить единицы, размеры которых выражаются через значения единых для всей Вселенной фундаментальных физических констант. Ценность указанных эталонов не только в их естественности, но и в высокой степени их воспроизводимости. Это открывает широкие возможности *децентрализованного воспроизведения единиц* и, хотя бы частично, упразднения мало эффективной и дорогостоящей системы централизованной передачи размеров единиц величин средствам измерений.

Для обеспечения высокой точности эталонов, использующих квантовые эффекты, задачей первостепенной важности является определение точных значений фундаментальных физических констант. Работы в этом направлении ведутся многими лабораториями мира при координации Международной организации КОДАТА (Комитет по численным данным для науки и техники).

КОДАТА проводит математическую обработку и согласование получаемых данных. Рекомендованные значения фундаментальных физических констант публикуются для использования специалистами всех областей знаний, в том числе и специалистами международных метрологических организаций.

В 1983 г. решениями XVII ГКМВ значение скорости распространения плоских электромагнитных волн в вакууме (скорость света)  $c_0$  постулировано равным 299 792 458 m/s (точно). Тогда же принято решение считать значение электрической постоянной  $\epsilon_0$  вакуума равным  $8,854\ 187\ 817 \dots 10^{-12}$  F/m (точно). Указанные значения физических констант используются при определении размера единицы длины (метра) в едином эталоне времени, частоты и длины.

Решением Международного консультативного комитета по электричеству в 1988 г. на основании данных КОДАТА было принято решение постулировать как точные значения констант Джозефсона ( $2e/h$ ) и фон Клитцинга ( $h/e^2$ ). В том же году с целью повышения точности размеров производных электрических единиц на основе эффекта Джозефсона и

квантового эффекта Холла Международным комитетом мер и весов (МКМВ) с 1 января 1990 г. введены условные обозначения и значения:

- константы Джозефсона  $K_{J-90} = 4,835979 \cdot 10^{14}$  Hz/V (точно);

- константы фон Клитцинга  $R_{K-90} = 25812,807$   $\Omega$  (точно).

Для повышения точности воспроизведения размеров единиц электрических и магнитных величин магнитной постоянной  $\mu_0$  вакуума приписано точное значение, равное  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/м или  $12,566\ 370\ 614... \cdot 10^{-7}$  Н/м (точно). Магнитная постоянная входит в рационализированные уравнения электромагнитного поля в соответствии с которыми образуют единицы этих величин в Международной системе единиц.

Из рассмотренных естественных эталонов только один эталон электрического сопротивления воспроизводит размер единицы, выражаемый исключительно через значения фундаментальных физических констант. Размеры единиц, воспроизводимых другими естественными эталонами (вольта, ампера, метра), выражаются не только через значения физических констант, но и через единицу частоты, размер которой должен воспроизводиться независимо и передаваться централизованно, так как он не может быть вычислен через значения физических констант. Однако в настоящее время, централизованное воспроизведение единицы частоты не является препятствием повышения точности других эталонов, так как размер этой единицы с высочайшей точностью может передаваться на практически любые расстояния по волоконно-оптическим и спутниковым каналам связи.

В идеальном виде система естественных эталонов должна быть такой, чтобы размеры всех воспроизводимых единиц величин выражались только через значения фундаментальных физических констант.

Подобное воспроизведение единицы частоты возможно, если принять, например, в качестве эталонной частоту двухфотонного оптического перехода  $1s - 2s$  в водороде, измеряемую методами бездоплеровской лазерной спектроскопии. Стандартное отклонение частоты этого

перехода, вычисляемой через значения фундаментальных физических констант, не превышает  $10^{-12}$  Hz.

Наиболее существенным препятствием развития современной системы эталонов (гирей на ногах и в прямом и в переносном смысле) является то, что одна из основных единиц, единица массы, воспроизводится с помощью прототипа. Природный же масштаб этой единицы, задается объектами микромира (например, атомами) и очень мал для практического применения. Переход к массе макрообъектов осуществляется с помощью фундаментальной физической константы – числа Авогадро, значение которой известно в настоящее время не настолько точно, чтобы обеспечить воспроизведение единицы массы - килограмма – со стандартным отклонением менее  $10^{-8}$  kg.

#### 4.4. Передача размеров единиц величин

##### 4.4.1. Система передачи размеров единиц

Как уже отмечалось, любая измерительная процедура состоит в сравнении неизвестного размера измеряемой величины с известным размером, в качестве которого используется размер соответствующей единицы.

Хранителем размера единицы опосредовано является средство измерений, используемое при проведении конкретной измерительной процедуры. Информация о размерах единиц закладывается в средства измерений при их изготовлении и выпуске в обращение путем приписывания определенных (номинальных) значений мерам, отметкам шкал измерительных приборов, функциям преобразования измерительных преобразователей. Подобная метрологическая процедура называется *градуировкой средств измерений*. В некоторых случаях составляются градуировочные таблицы или графики. Для ряда средств измерений, как правило, высокой точности, бывает необходимо определить *поправки*, используемые для уточнения результатов измерений, получены с помощью этих средств. Для этого определяют действительные значения величин, воспроизводимых мерами, или величин,

соответствующих отметкам шкал измерительных приборов или определенным выходным сигналам измерительных преобразователей. Такая метрологическая процедура называется *калибровкой средств измерений*. Сохранность информации о размерах единиц, заложенной в средства измерений, в процессе их эксплуатации контролируется путем *поверки средств измерений*.

Таким образом, путем градуировки, калибровки, поверки средств измерений осуществляется передача средствам измерений размеров единиц величин. Эти метрологические процедуры проводят путем сравнения значений величин, полученных с помощью данных средств измерений, с заведомо более точно известными значениями соответствующих величин.

Посредством этих процедур, осуществляемых путем сличений менее точных средств измерений с более точными средствами, размеры единиц, заложенные в средства измерений, последовательно приводят к размерам единиц, воспроизводимых и (или) хранимых соответствующими эталонами.

Использовать при градуировке, калибровке, поверке средств измерений (СИ) государственные эталоны нельзя. Эти уникальные средства являются национальным достоянием, основой технической независимости страны. Поэтому при централизованном воспроизведении единиц величин создают строгую, метрологически взаимоподчиненную, иерархическую *систему передачи размеров единиц*, структура которой показана на рис. 4.6.

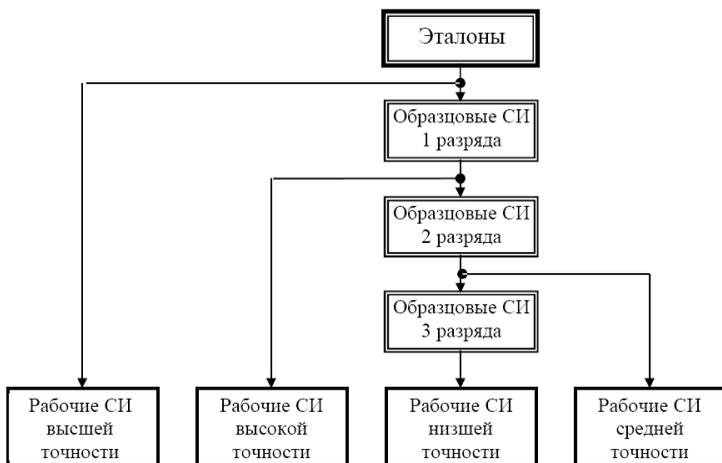


Рис. 4.6. Структура системы передачи размеров единиц величин

В этой системе размеры единиц от эталонов (непосредственно от рабочих эталонов в соответствии с рис. 4.1.) передают с помощью средств измерений специального назначения называемых *образцовыми средствами измерений*.

Специфичность образцовых средств измерений (ОСИ) заключается именно в их метрологическом назначении – эти средства измерений используются только в процедурах передачи размеров единиц. С целью обеспечения долговременной стабильности метрологических свойств образцовых средств измерений, использовать их в других целях **запрещается**.

Средства измерений, используемые для измерений не связанных с передачей размеров единиц, называются *рабочими средствами измерений*.

Разделение средств измерений на образцовые и рабочие является, в некоторой степени, условным и определяется только *метрологическим назначением СИ* и не связано, в большинстве случаев, с их конструктивными или иными особенностями. Только очень ограниченное число типов средств измерений специально проектируется и выпускается как образцовые СИ. Основная масса средств измерений выпускается без указания их

метрологического назначения. Затем в процессе эксплуатации конкретные экземпляры средств измерений отбираются для использования в качестве образцовых средств измерений.

Утверждение средств измерений в качестве ОСИ осуществляется органами *государственной метрологической службы* на основании всестороннего исследования метрологических свойств этих средств измерений в процессе их *метрологической аттестации*. Определяющим критерием при утверждении средств измерений в качестве ОСИ является высокая *временная стабильность* метрологических характеристик этих средств и малая, по сравнению с другими экземплярами однотипных средств измерений, *случайная составляющая погрешности*.

Поскольку стабильность метрологических свойств СИ во многом определяется интенсивностью их эксплуатации, использование рабочих средств измерений, даже высокой точности, в процедурах передачи размеров единиц без предварительной метрологической аттестации **запрещается**.

По метрологическому взаимоподчинению и, следовательно, по точности образцовые средства измерений подразделяются на разряды. Образцовые средства измерений, получающие размер единицы непосредственно от эталонов, относятся к первому разряду, далее, по мере уменьшения точности, следуют ОСИ второго разряда, третьего и т. д.

Номенклатура, число разрядов ОСИ и количество ОСИ каждого разряда должны быть достаточны для передачи размера единицы всем без исключения средствам измерений каждой из измеряемых величин.

Следует отметить, что на каждом этапе передачи размера единицы от одного средства измерений к другому происходит накопление погрешностей. Поэтому, при значительном числе ступеней передачи размера единицы (значительное число разрядов ОСИ) простейшему из рабочих средств измерений можно гарантировать только весьма низкую точность. С другой стороны, при малом числе разрядов ОСИ и значительном количестве соподчиненных с ними средств измерений необходимо, с целью обеспечения оперативности передачи размера единицы, увеличивать количество образцовых средств

измерений каждого разряда. При этом существенно возрастает интенсивность использования эталона, что может привести к его преждевременному износу и потере требуемых метрологических свойств. Поэтому определение оптимального числа разрядов ОСИ для каждой из измеряемых величин является сложной технико-экономической задачей.

При определении числа разрядов образцовых средств измерений учитывают запас по точности эталона, общее количество эксплуатируемых средств измерений каждого уровня точности и назначение этих СИ, стоимость продукции, контролируемой этими СИ и требуемую точность рабочих средств измерений низшей точности (см. рис. 4.6.), как правило, наиболее многочисленных.

Подобным образом структура передачи размера единицы формируется для каждой измеряемой величины в соответствии с положениями МИ 83-76 и оформляется в виде специальной схемы - *поверочной схемы*.

#### **4.4.2. Методы передачи размеров единиц**

Метрологическое качество и производительность работ по передаче средствам измерений размеров единиц величин во многом зависит от рационального выбора метода передачи.

В метрологической практике повсеместно используются следующие методы передачи размеров единиц:

- *метод непосредственного сличения;*
- *метод сличения с помощью компаратора* (сравнивающего устройства);
- *метод прямых измерений;*
- *метод косвенных измерений.*

**Метод непосредственного сличения** заключается в сличении показаний образцового и контролируемого средств измерений, проводимого без применения каких-либо сравнивающих или иных технических средств.

Метод используется при градуировке, калибровке, проверке измерительных приборов и ряда мер (например, мер вместимости) низкой и средней точности. Это наиболее технически простой метод, не требующий высокой

квалификации оператора. При определенных условиях метод позволяет с помощью одного образцового прибора определять метрологические характеристики значительного числа одновременно включенных однотипных контролируемых измерительных приборов. Например, при определении характеристик счетчиков электрической энергии методом непосредственного сличения число одновременно включенных приборов может составлять несколько сотен.

**Метод сличения с помощью компаратора** состоит в сравнении входной величины контролируемого измерительного прибора или величины, воспроизводимой контролируемой мерой, с величиной, воспроизводимой образцовой мерой, с помощью сравнивающего устройства.

Метод используется при градуировке, калибровке, проверке измерительных приборов, мер, измерительных преобразователей предельно высокой точности. Для исключения систематических погрешностей, возникающих при передаче размеров единиц, широко используются методы, рассмотренные в разделе 2.6.3., в частности, методы замещения, противопоставления, компенсации погрешности по знаку. При этом могут применяться различные устройства сравнения – нулевые, дифференциальные, термоэлектрические, интерференционные и ряд других, что делает этот метод наиболее технически и методически сложным и требует операторов высокой метрологической квалификации.

**Метод прямых измерений** в свою очередь можно подразделить на следующие два метода:

- прямое измерение контролируемым измерительным прибором величины, полученной с помощью образцового средства измерений (образцовой меры);
- прямое измерение образцовым средством измерений (образцовым прибором) величины, воспроизводимой контролируемой мерой.

Данный метод технически просто поддается автоматизации и является наиболее производительным методом передачи размеров единиц для мер и измерительных приборов. В последнее время метод получил широкое распространение благодаря появлению на рынке достаточно точных

многозначных образцовых мер различных величин – калибраторов. Наличие простых в управлении переносных калибраторов позволяет осуществлять передачу размеров единиц техническим средствам измерений непосредственно на месте их установки.

К методу прямых измерений можно отнести также **независимую** калибровку (поверку), проводимую без применения образцовых средств измерений и представляющую собой, по сути, *совокупные измерения*.

Данный метод возник при разработке особо точных средств измерений, определение погрешности которых невозможно другими методами. Однако этот метод применим только к тем средствам измерений, принцип действия которых базируется на отношении одноименных параметров измерительной цепи (делители напряжения, потенциометры постоянного тока).

Например, для делителей напряжения основной параметр – коэффициент деления – зависит не от конкретных значений электрического сопротивления плеч, а от отношения этих значений. Поэтому при определении погрешности коэффициента деления нет необходимости в передаче этому делителю размера единицы сопротивления, а достаточно определить соотношение сопротивлений плеч. В данном случае метод реализуется в последовательном выделении и сравнении между собой одноименных параметров измерительной цепи, имеющих равные номинальные значения.

**Метод косвенных измерений.** При реализации этого метода значение величины на выходе контролируемой меры или на входе контролируемого измерительного прибора определяется косвенно, путем прямых измерений других величин, связанных с искомой величиной известной зависимостью.

Из всех рассмотренных методов метод косвенных измерений является наименее производительным. Для обеспечения достоверности передачи размеров единиц этим методом приходится предъявлять повышенные требования к образцовым средствам измерений и вспомогательному оборудованию, жестко фиксировать условия проведения измерений. Метод косвенных измерений применяется в тех

случаях, когда другие методы передачи размеров единиц не могут быть реализованы или когда косвенные измерения более точны или более просты по сравнению с прямыми измерениями.

#### 4.4.3. Поверочные схемы

В современных международных документах, устанавливающих основные положения в социально-экономической сфере деятельности мирового сообщества – качество и безопасность продукции и услуг, экологическая безопасность, защита прав потребителей и многих других областях – основным требованием к средствам измерений, используемым при этой деятельности, устанавливается требование *прослеживаемости* результатов измерений, полученных с помощью каждого конкретного средства измерений.

Под термином **прослеживаемость** (англ. - traceability) понимают обеспеченность связи результата измерений с соответствующими международными или национальными эталонами посредством непрерывной цепи сличений. Таким образом, прослеживаемость подразумевает наличие неразрывной цепи передачи размера единицы от эталона до конкретного средства измерений и наличие определенного порядка и рациональности в осуществлении этого процесса. Подобный порядок в государствах-участниках Соглашения «О проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации», в том числе и в Узбекистане, устанавливается в специальных документах - *поверочных схемах*.

**Поверочная схема** – это утвержденный в установленном порядке документ, регламентирующий порядок передачи размера единицы от эталона или исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений и устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в процессе передачи размера единицы.

Следует отметить, что поверочная схема является *основным документом*, определяющим передачу размера единицы конкретной величины.

В поверочной схеме указывают наименования эталонов, образцовых и рабочих средств измерений, методы передачи размера единицы, являющиеся структурными элементами схемы, и направление передачи размера. В схеме приводят

также погрешности воспроизведения и передачи размера единицы, диапазоны измерений и погрешности всех образцовых и рабочих средств измерений, указанных в схеме. В ряде случаев в поверочных схемах приводят также типы образцовых средств измерений и средств сравнения (сличения).

Методы передачи размера единицы в поверочных схемах устанавливают в соответствии с методами, рассмотренными в разделе 4.4.2.

Поверочные схемы составляют для *каждой* измеряемой величины. В ряде случаев составляют несколько поверочных схем для средств измерений одной и той же величины для разных диапазонов ее значений. Поверочные схемы составляют при наличии не менее двух ступеней передачи размера единицы.

Вершиной поверочной схемы является эталон или исходное для данного региона или организации образцовое средство измерений.

В зависимости от области распространения поверочные схемы подразделяют на следующие виды:

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

**Межгосударственная поверочная схема** – это схема, распространяющаяся на все средства измерений конкретной величины, применяемые на территории государств-участников Соглашения «О проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации» (см. введение). Вершиной межгосударственной поверочной схемы является межгосударственный первичный эталон соответствующей единицы.

**Государственная поверочная схема** - поверочная схема, распространяющаяся на все средства измерений данной величины, имеющиеся в стране. Вершиной государственной поверочной схемы является государственный эталон или исходное для страны образцовое средство измерений.

**Локальная поверочная схема** – поверочная схема, распространяющаяся на все средства измерений данной величины, применяемые в регионе, ведомстве, отрасли,

объединении предприятий, или в отдельном предприятии (организации). Вершиной локальной поверочной схемы является исходное для данного предприятия, группы предприятий, ведомства или региона образцовое средство измерений или рабочий эталон.

В локальных поверочных схемах указывают разряды образцовых средств измерений, установленные для этих средств измерений в соответствующих государственных поверочных схемах.

Локальная поверочная схема не должна противоречить государственной поверочной схеме для средств измерений той же величины, а государственная поверочная схема не должна противоречить межгосударственной схеме. В свою очередь межгосударственная поверочная схема должна быть согласованной с международной поверочной схемой (при наличии таковой).

Поверочные схемы оформляются, как правило, в виде нормативного документа.

Межгосударственные и государственные поверочные схемы разрабатывают метрологические институты, осуществляющие хранение и применение межгосударственных (государственных) эталонов. К разработке таких схем могут быть привлечены ведущие метрологические службы ведомств и организаций, обладающие соответствующим профессиональным потенциалом.

Межгосударственные поверочные схемы оформляются в виде межгосударственного стандарта (ГОСТ) или правил по межгосударственной стандартизации (ПМГ).

Государственные поверочные схемы оформляются в виде нормативного документа государственного уровня. Так, государственные поверочные схемы Узбекистана оформляются в виде государственного стандарта (O'z DSt) или руководящего документа (O'z RH) Узбекистана.

Межгосударственные и государственные поверочные схемы обычно утверждаются одновременно с утверждением соответствующего эталона. В ряде случаев описание эталона, требования к эталону и поверочную схему регламентируют одним межгосударственным или государственным

нормативным документом в соответствии с видом поверочной схемы.

Локальные поверочные схемы, в зависимости от области их распространения, разрабатывают головные и базовые метрологические службы ведомств, объединений, метрологические службы организаций. Локальные поверочные схемы ведомств и объединений должны быть согласованы национальным метрологическим институтом – держателем национальных эталонов, а поверочные схемы организаций и предприятий – региональным центром государственной метрологической службы.

Локальная поверочная схема может быть оформлена в виде отраслевого стандарта или стандарта предприятия.

Построение и содержание поверочных схем установлено межгосударственным стандартом ГОСТ 8.061-2006.

Поверочная схема представляет собой чертеж, разделенный горизонтальными пунктирными линиями на ряд полей, расположенных друг под другом. Каждое поле соответствует одной ступени передачи размера единицы. Число полей зависит от структуры поверочной схемы. Поля имеют наименования, расположенные по вертикали в левой части чертежа и отделенные вертикальной сплошной чертой.

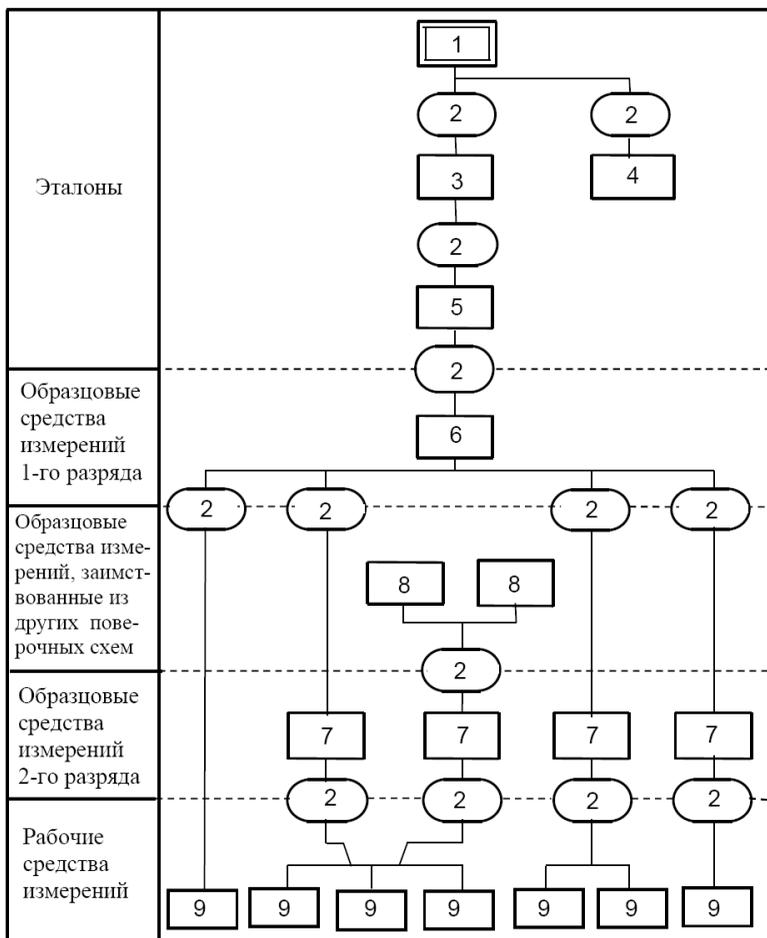
Пример компоновки элементов государственной поверочной схемы представлен на рис. 4.7.

Верхнее поле соответствует межгосударственному или государственному эталону, для межгосударственных или государственных поверочных схем соответственно, или исходному образцовому средству измерений, включая рабочий эталон, при его наличии, для локальных поверочных схем.

Далее следуют поля, соответствующие образцовым средствам измерений. Поле образцовых средств измерений первого разряда располагается непосредственно под полем эталонов. Затем, сверху вниз, располагают поля образцовых средств измерений других разрядов в порядке их метрологической соподчиненности. Нижнее поле соответствует рабочим средствам измерений.

В полях располагают заключенные в прямоугольники наименования эталонов и образцовых средств измерений с

указанием диапазонов измерений и характеристик погрешностей (неопределенности - для эталонов и исходных образцовых средств измерений). Наименование первичного эталона и его характеристики указывают в прямоугольнике, обведенном двойной линией. При наличии для данной величины, наряду с первичным эталоном, вторичных эталонов, прямоугольники с их наименованиями и характеристиками также располагают в верхнем поле межгосударственной (государственной) поверочной схемы ниже прямоугольника с наименованием первичного эталона.



1 - государственный эталон; 2 - метод передачи размера единицы; 3 - эталон-копия; 4 - эталон сравнения (для международных сличений); 5 - рабочий эталон; 6 - 7 - образцовые средства измерений (СИ) соответствующих разрядов; 8 - образцовые СИ, заимствованные из других поверочных схем; 9 - рабочие СИ

Рис. 4.7. Пример компоновки элементов государственной поверочной схемы

Если для данной величины отсутствует эталон, а единица величины воспроизводятся косвенным путем, то в верхнем поле поверочной схемы помещают наименования образцовых средств

измерений, применяемых для воспроизведения данной единицы, заимствованные из других поверочных схем. В этом случае на поверочной схеме должна быть ссылка на поверочные схемы, из которых заимствованы указанные образцовые средства измерений.

Характеристики погрешностей эталонов приводят в соответствии с межгосударственными стандартами ГОСТ 8.381-80 и ГОСТ 8.057:2006, характеристики образцовых средств измерений – по ГОСТ 8.009-84.

Погрешности образцовых средств измерений указывают в виде пределов допускаемых погрешностей при соответствующей доверительной вероятности 0,90; 0,95 или 0,99.

Наименования, диапазоны измерений и характеристики погрешностей рабочих средств измерений также указывают в прямоугольниках, расположенных на одном горизонтальном уровне.

Характеристики погрешностей указывают в виде пределов допускаемой погрешности (в соответствии с ГОСТ 8.009-84), цены деления или класса точности (по ГОСТ 8.401-80).

Наименования и обозначения величин и их единиц на поверочных схемах должны быть указаны в соответствии с O'z DSt 8.012:2005.

Форма выражения погрешностей образцовых и рабочих средств измерений в пределах одной поверочной схемы должна быть одинакова.

Рабочие средства измерений подразделяют по диапазонам измерений и по точности на группы. Эти группы располагают в порядке убывающей точности таким образом, чтобы наименования наиболее точных средств измерений находились в левой части поля. При необходимости рабочие средства измерений группируются по используемым для них методам передачи размера единицы.

На границах раздела полей (в разрывах пунктирных линиях) в кругах или овалах указывают наименования конкретных методов передачи размера единицы. Там же, при необходимости, указывают погрешность (неопределенность) приведенного метода передачи размера единицы.

Передачу размера единицы от эталона (исходного образцового средства измерений) образцовым и рабочим средствам измерений показывают линиями, соединяющими прямоугольники и овалы (круги). Соединительные линии, как правило, не должны пересекаться.

Пример чертежа локальной поверочной схемы приведен в приложении Д.

В документ, регламентирующий передачу размера единицы конкретной величины (поверочную схему), кроме непосредственно чертежа поверочной схемы включают пояснительный текст, в котором приводят описание каждого структурного элемента поверочной схемы и необходимую дополнительную информацию.

Параметры поверочных схем рассчитывают в соответствии с методикой, изложенной в МИ 83-76.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1.

Производные единицы  
Международной системы единиц (СИ),  
имеющие специальные наименования и обозначения

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	выражение через основные и производные единицы СИ
Плоский угол	$L$	радиан	rad	$m \cdot m^{-1} = 1$
Телесный угол	$L$	стерадиан	sr	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
Частота	$T^{-1}$	герц	Hz	$s^{-1}$
Сила	$LMT^{-2}$	ньютон	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Давление	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2MT^{-2}$	джоуль	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Мощность	$L^2MT^{-3}$	ватт	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Электрический заряд, количество электричества	$TI$	кулон	C	$s \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$

Электрическая емкость	$L^2M^{-1}T^4I^2$	фарад	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
-----------------------	-------------------	-------	---	--------------------------------------------

Продолжение таблицы А.1.

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	выражение через основные и производные единицы СИ
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	$\Omega$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Температура Цельсия	$\theta$	градус Цельсия	$^{\circ}C$	K
Световой поток	$J$	люмен	lm	$cd \cdot sr$
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)	$T^{-1}$	беккерель	Bq	$s^{-1}$
Поглощенная	$L^2T^{-2}$	грей	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$

доза ионизирующего излучения, керма				
-------------------------------------------	--	--	--	--

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	выражение через основные и производные единицы СИ
Эквивалентная доза ионизирующего излучения, эффективная доза ионизирующего излучения	$L^2T^{-2}$	зиверт	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$
Активность катализатора	$NT^{-1}$	катал	kat	$mol \cdot s^{-1}$
<p>Примечания</p> <p>1 В таблицу включены единица плоского угла – радиан и единица телесного угла – стерadian.</p> <p>2 В Международную систему единиц при ее принятии в 1960 г. на XI ГКМВ (Резолюция 12) вошло три класса единиц: основные, производные и дополнительные (радиан и стерadian). ГКМВ классифицировала единицы радиан и стерadian как «дополнительные, оставив открытым вопрос о том, являются они основными единицами или производными». В целях устранения двусмысленного положения этих единиц Международный комитет мер и весов в 1980 г. (Рекомендация 1) решил интерпретировать класс дополнительных единиц СИ как класс безразмерных производных единиц, для которых ГКМВ оставляет открытой возможность применения или неприменения их в выражениях для производных единиц СИ. В 1995 г. XX ГКМВ (Резолюция 8) постановила исключить класс дополнительных единиц в СИ, а радиан и стерadian считать безразмерными производными единицами СИ (имеющими специальные наименования и обозначения), которые могут быть использованы или не использованы в выражениях для других производных единиц СИ (по необходимости).</p> <p>3 Единица катал введена в соответствии с резолюцией 12 XXI</p>				

ГКМВ.

Таблица А.2.

Внесистемные единицы,  
допущенные к применению наравне с единицами  
Международной системы единиц

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ	область применения
Масса	тонна	t	$1 \cdot 10^3 \text{ kg}$	Все области
	атомная единица массы <sup>1)</sup>	u	$1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (приблизительно)	Атомная физика
Время <sup>1), 2)</sup>	минута	min	60 s	Все области
	час	h	3600 s	
	сутки	d	86400 s	
Плоский угол <sup>1)</sup>	градус <sup>2)</sup>	... °	$(\pi/180) \text{ rad} = 1,745329 \dots \cdot 10^{-2} \text{ rad}$	Все области
	минута <sup>1), 3)</sup>	... ′	$(\pi/10800) \text{ rad} = 2,908882 \dots \cdot 10^{-4} \text{ rad}$	
	секунда <sup>1), 3)</sup>	... ″	$(\pi/648000) \text{ rad} = 4,848137 \dots \cdot 10^{-6} \text{ rad}$	
	град (гон)	gon	$(\pi/200) \text{ rad} = 1,57080 \dots \cdot 10^{-2} \text{ rad}$	Геодезия
Объем, вместимость	литр <sup>4)</sup>	l	$1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	Все области
Длина	астрономическая единица	ua	$1,49598 \cdot 10^{11} \text{ m}$ (приблизительно)	Астрономия
	единица световой год	ly	$9,4605 \cdot 10^{15} \text{ m}$ (приблизительно)	
	парсек	pc	$3,0857 \cdot 10^{16} \text{ m}$ (приблизительно)	
Оптическая сила	диоптрия	dptr	$1 \text{ m}^{-1}$	Оптика
Площадь	гектар	ha	$1 \cdot 10^4 \text{ m}^2$	Сельское и лесное хозяйство

Окончание таблицы А.2.

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ	область применения
Энергия	электрон-вольт	eV	$1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ (приблизительно)	Физика
	киловатт-час	kW·h	$3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$	Для счетчиков электрической энергии
Полная мощность	вольт-ампер	V·A		Электротехника
Реактивная мощность	вар	var		Электротехника
Электрический заряд, количество электричества	ампер-час	A·h	$3,6 \cdot 10^3 \text{ C}$	Электротехника
<p>1) Наименования и обозначения единиц времени (минута, час, сутки), плоского угла (градус, минута, секунда), астрономической единицы, диоптрии и атомной единицы массы не допускается применять с приставками.</p> <p>2) Допускается также применять другие единицы, получившие широкое распространение, например, неделя, месяц, год, век, тысячелетие.</p> <p>3) Обозначения единиц плоского угла пишут над строкой.</p> <p>4) Не рекомендуется применять при точных измерениях. При возможности смещения обозначения l («эль») с цифрой 1 допускается обозначение L.</p>				

Таблица А.3.

Некоторые относительные и логарифмические величины  
и их единицы

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	значение
1 Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): КПД; относительное удлинение; относительная плотность; деформация; относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости; магнитная восприимчивость; массовая доля компонента; молярная доля компонента и т. п.	единица процент промилле миллионная доля миллиардная доля	1 % ‰ ppm  ppb	1 $1 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-6}$  $1 \cdot 10^{-9}$
2 Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную величину): уровень звукового давления; усиление; ослабление и т. п. 2)	бел 1)	В	1 В = $\lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10 P_1$ 1 В = $2 \lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10} F_1$ , где $P_2, P_1$ – одноименные энергетические величины (мощность, энергия, плотность энергии и т. п.); $F_2, F_1$ –

	децибел	дВ	одноименные «силовые» величины (напряжение, ток, напряженность поля и т. п.) 0,1 В
--	---------	----	---------------------------------------------------------------------------------------------------

Наименование величины	Единица		
	наименовани е	обознач ение	значение
3 Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную величину): уровень громкости	фон	phon	1 phon равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Hz равен 1 dB
<p>Примечания</p> <p>1 При выражении в логарифмических единицах разности уровней мощностей или амплитуд двух сигналов всегда существует квадратичная связь между отношением мощностей и соответствующим ему отношением амплитуд колебаний, поскольку параметры сигналов определяют для одной и той же нагрузки <math>Z</math>, т. е.</p> $\frac{F_2^2}{Z} / \frac{F_1^2}{Z} = F_2^2 / F_1^2 = P_2 / P_1.$ <p>В теории автоматического регулирования часто определяют логарифм отношения <math>F_{\text{вых}} / F_{\text{вх}}</math>. В этом случае между отношением мощностей и отношением соответствующих напряжений нет квадратичной зависимости. Вместе с тем по ранее сложившейся практике применения логарифмических единиц, несмотря на отсутствие квадратичной связи между отношением мощностей и соответствующим ему отношением амплитуд колебаний, и в этом случае принято единицу «бел» определять следующим образом:</p> <p>1 В = <math>\lg (P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}})</math> при <math>P_{\text{вых}} = 10 P_{\text{вх}}</math>,</p> <p>1 В = <math>2 \lg (F_{\text{вых}} / F_{\text{вх}})</math> при <math>F_{\text{вых}} = \sqrt{10} F_{\text{вх}}</math>.</p> <p>Задача установления связи между напряжениями и мощностями, если ее ставят, решается путем анализа электрических или других цепей.</p>			

Таблица А.4.

Множители и приставки,  
используемые для образования наименований и обозначений  
десятичных кратных и дольных единиц  
Международной системы единиц

Десятичный множитель	Приставка	Обозначение приставки	Десятичный множитель	Приставка	Обозначение приставки
$10^{24}$	иота	Y	$10^{-1}$	деци	d
$10^{21}$	зетта	Z	$10^{-2}$	санتي	c
$10^{18}$	экса	E	$10^{-3}$	милли	m
$10^{15}$	пета	P	$10^{-6}$	микро	$\mu$
$10^{12}$	тера	T	$10^{-9}$	нано	n
$10^9$	гига	G	$10^{-12}$	пико	p
$10^6$	мега	M	$10^{-15}$	фемто	f
$10^3$	кило	k	$10^{-18}$	атто	a
$10^2$	гекто	h	$10^{-21}$	zepto	z
$10^1$	дека	da	$10^{-24}$	иокто	y

Примечания:

1 В связи с тем, что наименование основной единицы килограмм содержит приставку «кило», для образования кратных и дольных единиц массы используют дольную единицу массы - грамм (0,001 kg), и приставки присоединяют к слову «грамм», например миллиграмм (mg) вместо микрокилограмм ( $\mu\text{kg}$ ).

2 Дольную единицу массы - грамм допускается применять, не присоединяя приставку (обозначение единицы - g).

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

*Таблица Б.1.*

Значения коэффициента  $t_p$  для случайной величины,  
имеющей распределение Стьюдента  
с  $k = n - 1$  степенями свободы

$$P\{|t| < t_p\} = 2 \int_0^{t_p} S(t, k) dt$$

$k = n - 1$	Значения коэффициента $t_p$				
	$P = 0,50$	$P = 0,70$	$P = 0,90$	$P = 0,95$	$P = 0,99$
1	0,100	1,963	6,314	12,706	63,657
3	0,765	1,250	2,363	3,182	5,841
5	0,727	1,156	2,015	2,571	4,032
7	0,711	1,119	1,895	2,365	3,499
9	0,703	1,100	1,883	2,262	3,250
11	0,697	1,088	1,796	2,201	3,106
13	0,694	1,079	1,771	2,160	3,012
15	0,691	1,074	1,753	2,131	2,947
17	0,689	1,069	1,740	2,110	2,898
19	0,688	1,066	1,729	2,093	2,861
21	0,686	1,063	1,721	2,080	2,831
23	0,685	1,060	1,714	2,069	2,807
25	0,684	1,058	1,708	2,060	2,787
27	0,684	1,057	1,703	2,052	2,771
29	0,683	1,055	1,669	2,045	2,756
$\infty$	0,674	1,036	1,645	1,959	2,57582

Таблица Б.2.

Интегральная функция нормированного  
нормального распределения

$$F(t_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t_p} e^{-t^2/2} dt$$

<b>№</b>	<b><math>t_p</math></b>	<b>0,08</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>
1	-3,5	0,00017	0,00019	0,00020	0,00022	0,00023
2	-3,3	0,00036	0,00039	0,00042	0,00045	0,00048
3	-3,1	0,00074	0,00079	0,00085	0,00090	0,00097
4	-2,9	0,0014	0,0015	0,0016	0,0017	0,0019
5	-2,7	0,0027	0,0029	0,0031	0,0033	0,0036
6	-2,5	0,0049	0,0052	0,0055	0,0059	0,0062
7	-2,3	0,0087	0,0091	0,0095	0,0102	0,0107
8	-2,1	0,0146	0,0154	0,0162	0,0170	0,0179
9	-1,9	0,0239	0,0250	0,0262	0,0274	0,0287
10	-1,7	0,0375	0,0392	0,0409	0,0427	0,0446
11	-1,5	0,0571	0,0594	0,0618	0,0643	0,0668
12	-1,3	0,0838	0,0869	0,0901	0,0934	0,0968
13	-1,1	0,1190	0,1230	0,1271	0,1314	0,1357
14	-0,9	0,1635	0,1685	0,1736	0,1788	0,1841
15	-0,7	0,2177	0,2236	0,2297	0,2358	0,2420
16	-0,5	0,2810	0,2877	0,2946	0,3015	0,3085
17	-0,3	0,3520	0,3594	0,3669	0,3745	0,3821
18	-0,1	0,4286	0,4364	0,4443	0,4522	0,4602

Окончание таблицы Б.2.

<b>№</b>	<b><math>t_p</math></b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,06</b>	<b>0,08</b>
19	0,0	0,5000	0,5080	0,5160	0,5239	0,5319
20	+0,2	0,5793	0,5871	0,5948	0,6026	0,6103
21	+0,4	0,6554	0,6628	0,6700	0,6772	0,6844
22	+0,6	0,7257	0,7324	0,7389	0,7454	0,7517
23	+0,8	0,7881	0,7939	0,7995	0,8051	0,8106
24	+1,0	0,8413	0,8461	0,8505	0,8554	0,8599
25	+1,2	0,8849	0,8888	0,8925	0,8962	0,8997
26	+1,4	0,9192	0,9222	0,9251	0,9279	0,9306
27	+1,6	0,9452	0,9474	0,9495	0,9515	0,9535
28	+1,8	0,9641	0,9656	0,9671	0,9686	0,9699
29	+2,0	0,9773	0,9783	0,9793	0,9803	0,9812
30	+2,2	0,9861	0,9868	0,9875	0,9881	0,9887
31	+2,4	0,9918	0,9922	0,9927	0,9931	0,9934
32	+2,6	0,9953	0,9956	0,9959	0,9961	0,9963
33	+2,8	0,9974	0,9976	0,9977	0,9979	0,9980
34	+3,0	0,99865	0,99874	0,99883	0,99889	0,99896
35	+3,2	0,99931	0,99936	0,99940	0,99954	0,99958
36	+3,4	0,99966	0,99969	0,99971	0,99973	0,99975

Таблица Б.3.

Значения  $(t_p)_{\max}$  при различных числах измерений  $n$ .

Число наблюдений $n$	Уровень значимости $q$				
	0,001	0,0025	0,01	0,025	0,05
3	1,414	1,414	1,414	1,414	1,412
4	1,732	1,730	1,728	1,710	1,689
5	1,994	1,982	1,972	1,917	1,869
6	2,212	2,183	2,161	2,067	1,996
7	2,395	2,344	2,310	2,182	2,093
8	2,547	2,476	2,431	2,273	2,172
9	2,677	2,586	2,532	2,349	2,238
10	2,788	2,680	2,616	2,414	2,294
11	2,884	2,760	2,689	2,470	2,343
12	2,969	2,830	2,753	2,519	2,387
13	3,044	2,892	2,809	2,563	2,426
14	3,111	2,947	2,859	2,602	2,461
15	3,171	2,997	2,905	2,638	2,494
16	3,225	3,042	2,946	2,670	2,523
17	3,274	3,083	2,983	2,701	2,551
18	3,320	3,120	3,017	2,728	2,577
19	-	-	2,932	2,754	2,600
20	-	-	2,959	2,778	2,623
21	-	-	3,071	2,880	2,707

Таблица Б.4

Интегральная функция  $\chi^2$  - распределения Пирсона.  
Значения  $\chi^2_{k,P}$  для различных  $k$  и  $P$ .

Число степеней свободы $k = n - 1$	$P_1 = 0,5 - P/2$				$P_2 = 0,5 + P/2$		
	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>
1	0,00016	0,00063	0,00093	0,0158	2,706	3,841	6,635
3	0,115	0,185	0,352	0,584	6,251	7,815	11,345
5	0,554	0,752	1,145	1,610	9,236	11,070	15,086
7	1,239	1,564	2,167	2,833	12,017	14,067	18,475
9	2,088	2,532	3,325	4,168	14,684	16,919	21,666
11	3,053	3,609	4,575	5,578	17,275	19,675	24,725
13	4,107	4,765	5,892	7,042	19,812	22,362	27,688
15	5,229	5,985	7,261	8,547	22,307	24,996	30,578
17	6,408	7,255	8,672	10,085	24,769	27,587	33,409
19	7,633	8,567	10,117	11,651	27,204	30,144	36,191
21	8,897	9,915	11,591	13,240	29,615	32,671	38,932
23	10,196	11,293	13,091	14,848	32,007	35,172	41,638
25	11,524	12,697	14,611	16,473	34,382	37,652	44,314
27	12,879	14,125	16,151	18,114	36,741	40,113	46,963
29	14,256	15,574	17,708	19,768	39,087	42,557	49,588

Таблица Б.5.

Квантили распределения статически d.

№	$d_{0,01}$	$d_{0,05}$	$D_{0,10}$	$d_{0,90}$	$d_{0,95}$	$d_{0,99}$
11	0,9359	0,9073	0,8899	0,7409	0,7153	0,6675
16	0,9137	0,8884	0,8733	0,7452	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,8631	0,7495	0,7304	0,6950
26	0,8901	0,8686	0,8570	0,7530	0,7360	0,7040
31	0,8827	0,8635	0,8511	0,7559	0,7404	0,7110
36	0,8769	0,8578	0,8488	0,7583	0,7440	0,7167
41	0,8722	0,8540	0,8486	0,7504	0,7470	0,7216
46	0,8682	0,8508	0,8409	0,7621	0,7496	0,7256
51	0,8648	0,8481	0,8385	0,7636	0,7518	0,7291

Таблица Б.6.

Значения  $m_0$  и  $P$ , соответствующие различным  $n$  и  $q$ .

$n$	$m_0$	$P$ при уровне значимости $q$ , равным		
		0,01	0,02	0,05
<b>10</b>	1	0,98	0,98	0,96
<b>11-14</b>	1	0,99	0,98	0,97
<b>15-20</b>	1	0,99	0,99	0,98
<b>21-22</b>	2	0,98	0,97	0,96
<b>23</b>	2	0,98	0,98	0,96
<b>24-27</b>	2	0,98	0,98	0,97
<b>28-32</b>	2	0,99	0,98	0,97
<b>33-35</b>	2	0,99	0,98	0,98
<b>36-49</b>	2	0,99	0,99	0,98

Таблица Б.7.

**F** - распределение Фишера.  
Значения  $F_{k_1, k_2}$  для различных доверительных вероятностей  $P$ .

$k_2$	$P$	$k_1$									
		1	2	3	4	5	10	20	50	100	200
1	0,75	5,83	7,50	8,20	8,58	8,82	9,32	9,58	9,74	9,78	9,82
	0,95	161	200	216	225	230	242	248	252	253	254
3	0,90	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,23	5,18	5,15	5,14	5,14
	0,99	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,2	26,7	26,4	26,2	26,2
5	0,90	4,06	3,38	3,62	3,52	3,45	3,30	3,21	3,15	3,13	3,12
	0,99	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,1	9,55	9,24	9,13	9,08
10	0,90	3,28	2,92	2,73	2,61	2,52	2,32	2,20	2,12	2,09	2,07
	0,99	10,0	7,56	6,55	5,99	5,64	4,85	4,41	4,12	4,01	3,95
16	0,90	3,05	2,67	2,46	2,33	2,24	2,03	1,89	1,79	1,76	1,74
	0,99	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	3,69	2,26	2,97	2,86	2,81
24	0,90	2,93	2,54	2,33	2,19	2,10	1,88	1,73	1,62	1,58	1,56
	0,99	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,17	2,74	2,44	2,33	2,27
30	0,90	2,88	2,49	2,28	2,14	2,05	1,82	1,66	1,55	1,51	1,48
	0,99	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	2,98	2,55	2,25	2,13	2,07
40	0,90	2,84	2,44	2,23	2,09	2,00	1,76	1,69	1,48	1,42	1,41
	0,99	7,31	5,08	4,31	4,83	3,51	2,80	2,37	2,06	1,94	1,87
60	0,90	2,79	2,39	2,18	2,04	1,95	1,71	1,54	1,41	1,36	1,33
	0,99	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	2,63	2,20	1,88	1,75	1,68
120	0,90	2,75	2,35	2,13	1,99	1,90	1,65	1,48	1,34	1,27	1,24
	0,99	6,85	4,79	3,95	3,48	3,17	2,47	2,03	1,70	1,56	1,48
200	0,90	2,73	2,33	2,11	1,97	1,88	1,63	1,46	1,31	1,24	1,20
	0,99	6,76	4,71	3,88	3,41	3,11	2,41	1,97	1,63	1,48	1,39
$\infty$	0,90	2,71	2,30	2,08	1,94	1,85	1,60	1,42	1,26	1,18	1,13
	0,99	6,63	4,61	3,78	3,32	3,02	2,32	1,88	1,52	1,36	1,25

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Номограммы определения значения коэффициента  $R$  для различных законов распределения суммарной погрешности  $\Delta_{\Sigma}$  и отклонений контролируемого параметра  $\delta_{\text{кп}}$

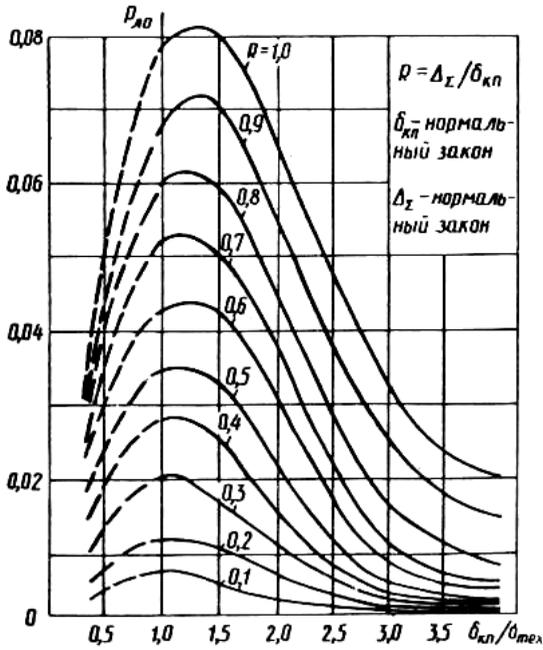


Рис. В.1.

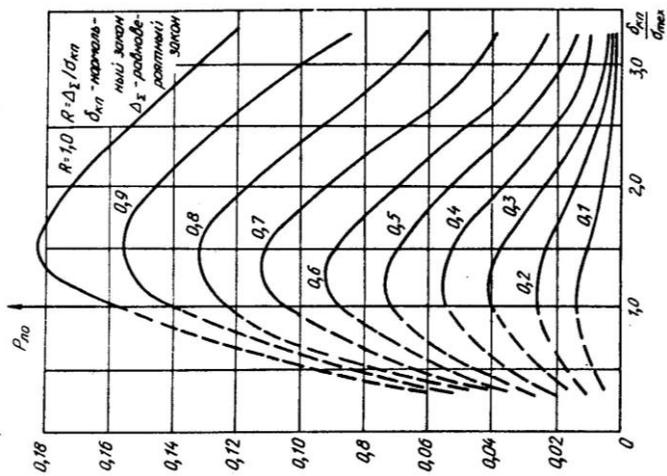


Рис. В.3.

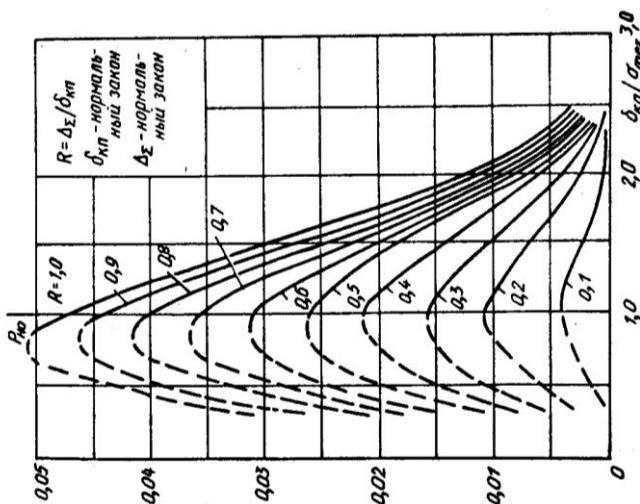


Рис. В.2.

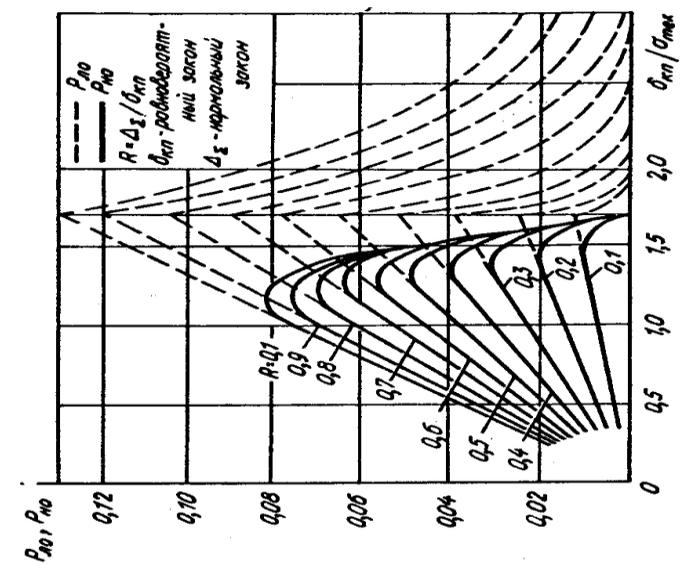


Рис. В.5.

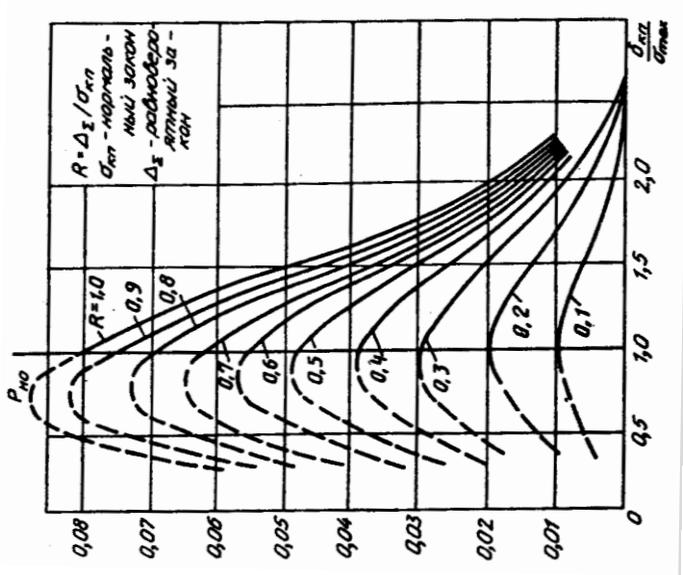
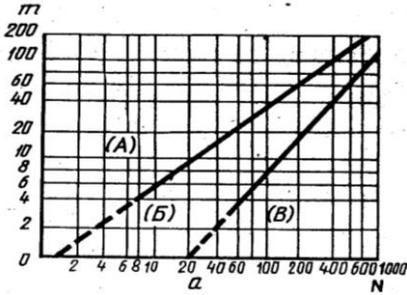


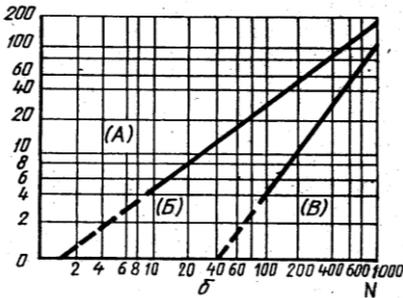
Рис. В.4.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

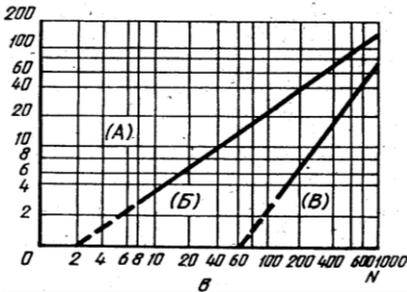
Графики для определения необходимости корректировки межповерочного интервала средств измерений



$$P_{\text{м.отк}} = 0,2$$



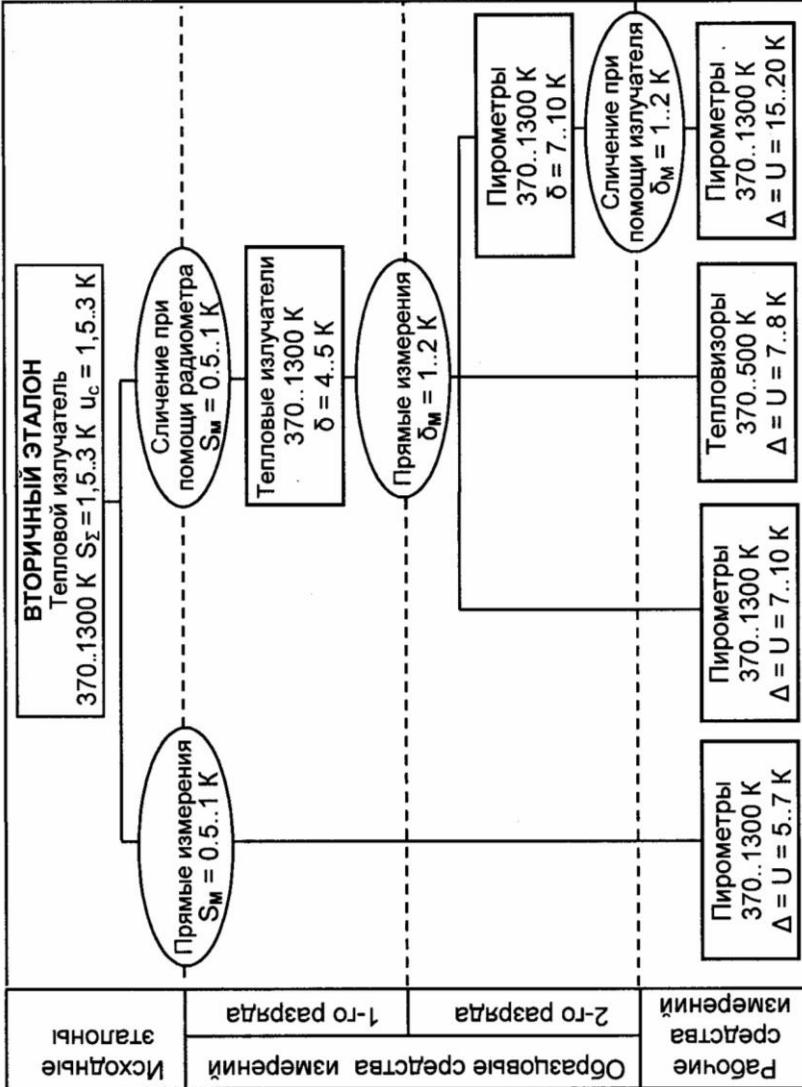
$$P_{\text{м.отк}} = 0,15$$



$$P_{\text{м.отк}} = 0,1$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Локальная поверочная схема для  
средств измерений температуры по инфракрасному излучению  
в диапазоне 370...1300 К



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Древние единицы величин народов Средней Азии

#### Единицы длины

Арпа дони = 3,5 mm
Бармоқ = 21 mm
Бир қатим ип = (50 – 60) cm
Бир қунишли масофа = 50 km
Газ = 0,71 m
Зар = 49,9 cm
От ёли = 0,6 mm
Таноб = 39,9 m
Тирсак = (0,5 - 0,8) m
Тутам = 4 бармоқ = (8,7 - 9,1) cm
Тўқимчилар гази = 2 қулоч = (3,3 - 3,4) m
Умар зираси (Ҳалифа Умарнинг тирсаги) = 72,8 cm
Фарсанг = (6 - 9) km
Чақирим = 900 m
Қадам $\cong$ 0,75 m
Қарич = (19 – 22,5) cm
Қулоч = (166 – 170) cm

#### Единицы площади

Саржин = $0,5 \times 2 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$
Таноб = $60 \times 60$ газ
Жуфт (Жуфти гов) – площадь земельного участка, который можно вспахать за один сезон с помощью пары быков

### Единицы объема

Ашир = 6 L
Биршола = 8,5 L
Лингча (кичкина қоғ) = 65 L
Мудд = 1,055 L
Ошам = (15 – 20) см <sup>3</sup>
Саноч = 30 L
Саржин = 0,5 × 1 × 2 m = 1 m <sup>3</sup>
Томчи = 0,05 ml
Хуплам (қултум) = (15 – 20) ml

### Единицы массы

Арпа дони = 0,04 g	Қитмир = 0,045 g
Бир эшак юк = 83 kg	Мисқол = 4,095 g
Бұғдой дони = 0,041 g	Истора = 4,5 мисқол = 18,5 g
Везне = (11-14) kg	Қадоқ = 100 мисқол = 410 g
Гандум = 0,048 g	Кумуш тош = 250 мисқол = 1,024 kg
Даврак = 1020 g	Олтин тош = 500 мисқол = 2,048 kg
Данг = 0,4 g	Пуд = 4 000 мисқол = 16,38 kg
Дахсар = 32 kg	Ботмон = 40 000 мисқол = 163,8 kg
Динор, дирам = 2,4 g	Окка = 1,3 kg
Дирхам = 2,97 g	Ош қошиқ = 15 g
Донак = 0,495 g	Ошам = (18 – 30) g
Драхмий = 4,25 g	Рай = 12 kg
Дунимсар = 1,6 kg	Сир = 6,55 kg
Жарра = 12,2 kg	Томчи = 0,05 g
Илча = 336 g	Тош (Санг) = 125 g
Карат = 0,2 g	Тул = 85 kg

### Единицы расхода жидкости

Қулоқ = 11,5 L/s
Тегирмон = 5 қулоқ = (55 – 60) L/s

### Единицы времени

Гирий = 0,4 h
Гох = 15 min
Идда = 4 месяца и 10 дней (в некоторых случаях 3 месяца)

## ИСТОЧНИКИ

1. Закон Республики Узбекистан «О метрологии», Ведомости Верховного Совета Республики Узбекистан, №2, 1994 г.

2. Закон Республики Узбекистан «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Узбекистан «О метрологии», Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, №5-6, 2000 г., № 5, 2003 г.

3. Модельный Закон «Об обеспечении единства измерений», Межпарламентская Ассамблея СНГ, 1998.

4. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 93 от 02.03.1992 «Об организации работы по стандартизации в Республике Узбекистан».

5. Межправительственное соглашение Государств СНГ «О проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации», 1992.

6. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 410 от 12.08.1994 «О внесении изменений и дополнений в некоторые решения Правительства Республики Узбекистан»

7. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 53 от 09.02.1996 «О формировании Национальной эталонной базы Республики Узбекистан и совершенствовании метрологического обеспечения»

8. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 342 от 03.10.2002 «О мерах по совершенствованию системы стандартизации, метрологии и сертификации продукции и услуг»

9. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 373 от 05.08.2004 «О совершенствовании структуры и организации деятельности Узбекского агентства стандартизации, метрологии и сертификации»

10. Международный документ МОЗМ Д 16 (1986) Принципы осуществления метрологического контроля

11. ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

12. ГОСТ 8.057-2006 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Основные положения

13. ГОСТ 8.061-2006 Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение

14. ГОСТ 8.010-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения

15. ГОСТ 8.207-76 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения

16. ГОСТ 8.381-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей

17. ГОСТ 8.401-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования

18. ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин

19. O'z DSt 8.010.1:2002 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан. Метрология. Термины и определения. Часть 1. Основные и общие термины

20. O'z DSt 8.010.2:2003 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан. Метрология. Термины и определения. Часть 2. Средства измерений и их параметры

21. O'z DSt 8.010.3:2004 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан. Метрология. Термины и определения. Часть 3. Метрологическая служба

22. O'z DSt 8.010.4:2002 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан.

Метрология. Термины и определения. Часть 4. Метрологическая обеспечения аналитического контроля

23. O'z DSt 8.012:2005 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан. Единицы величин

24. O'z DSt 8.014:2002 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, утверждения, регистрации, хранения и применения

25. ПМГ 35-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Положение о межгосударственном эталоне СНГ

26. РМГ 29-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

27. РМГ 43-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»

28. РД 50-453-84 Методические указания. Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета

29. МИ 83-76 Государственная система обеспечения единства измерений. Методика определения параметров поверочных схем

30. МИ 1317-86 Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты измерений и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров

31. МИ 1552-86 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений

32. МИ 2083-90 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей

33. O'z T 51-088:1999 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан.

Методики выполнения измерений. Построение, содержание, изложение и оформление

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1978.
2. Тюрин Н. И. Введение в метрологию. - М.: Изд-во стандартов, 1976.
3. Хакимов О.Ш. Теоретическая метрология. Учебное пособие. - Ташкент.: ТашГТУ, 1996.
4. Шишкин И. Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством. - М.: Изд-во стандартов, 1990.
5. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. - Л.: Изд-во «Энергия», 1978.
6. Артемьев Б. Г., Голубев С. М. Справочное пособие для работников метрологических служб. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
7. Российская метрологическая энциклопедия. под ред. Тарбеева Ю. В. – Санкт Петербург: Изд-во «Лики России», 2001.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Введение</b> .....	5
<b>Г л а в а 1. Объекты измерений</b> .....	10
1.1. Метрология – наука об измерениях. Роль метрологии в теории познания .....	10
1.2. Измеряемые величины .....	11
1.3. Качественная и количественная характеристики измеряемых величин. Шкалы величин .....	12
1.3.1. Система величин .....	12
1.3.2. Качественная характеристика величины. Размерность величины .....	13
1.3.3. Количественная характеристика величины. Размер и значения величины ...	14
1.3.4. Шкалы величин .....	16
1.4. Единицы величин. Международная система единиц .....	19
1.4.1. Основные принципы построения системы единиц .....	19
1.4.2. Международная система единиц .....	20
1.5. Метрологическая терминология .....	26
<b>Г л а в а 2. Основы теории измерений</b> .....	28
2.1. Виды и методы измерений .....	28
2.1.1. Измерения. Виды измерений .....	28
2.1.2. Методы прямых измерений .....	31
2.2. Основной постулат метрологии .....	33
2.3. Погрешности измерений .....	33
2.3.1. Классификация погрешностей. Основные понятия .....	33
2.3.2. Виды систематических погрешностей .....	36
2.4. Законы распределения вероятностей и их числовые характеристики .....	38
2.4.1. Функции распределения вероятностей случайных величин .....	38

2.4.2. Числовые характеристики распределения вероятностей.....	42
2.4.3. Законы распределения вероятностей случайных величин.....	47
2.4.4. Точечные оценки истинного значения измеряемой величины и среднеквадратического отклонения .....	51
2.5. Влияющие факторы.....	53
2.6. Исключение систематических погрешностей...	55
2.6.1. Основные приемы исключения систематических погрешностей.....	55
2.6.2. Исключение погрешностей до начала измерений .....	56
2.6.3. Исключение погрешностей в процессе измерений ....	57
2.6.4. Исключение систематических погрешностей путем внесения поправок..	64
2.6.5. Оценка границ неисключенных систематических погрешностей.....	65
2.7. Характеристики случайной погрешности.....	69
2.7.1. Количественные оценки рассеяния результатов измерений.....	69
2.7.2. Среднее квадратическое отклонение погрешности измерений .....	70
2.7.3. Доверительный интервал и доверительные границы погрешности измерений.....	73
2.7.4. Суммарная погрешность результата измерения .....	76
2.8. Обработка результатов измерений.....	79
2.8.1. Обработка результата однократных измерений .....	80
2.8.2. Обработка результатов многократных измерений .....	80
2.8.2.1. Обнаружение грубых погрешностей измерений.....	82

2.8.2.2. Проверка нормальности распределения результатов измерений.....	83
2.8.2.3. Определение доверительной вероятности результатов измерений...	86
2.8.3. Совместная обработка нескольких рядов измерений.....	86
2.8.4. Обработка неравнорассеянных рядов наблюдений .....	88
2.8.5. Округление результатов измерений. Правило округления. Критерий ничтожных погрешностей .....	89
2.9. Выражение неопределенности результатов измерений .....	91
<b>Глава 3. Средства и методики измерений.....</b>	<b>102</b>
3.1. Средства измерений.....	102
3.1.1. Меры.....	102
3.1.2. Измерительные преобразователи.....	103
3.1.3. Измерительные приборы.....	105
3.1.4. Измерительные установки и измерительные системы.....	109
3.2. Метрологические характеристики средств измерений .....	110
3.2.1. Основные понятия. Информативный параметр входных и выходных сигналов средств измерений .....	110
3.2.2. Основные статические характеристики средств измерений.....	112
3.2.3. Динамические характеристики средств измерений .....	116
3.2.4. Погрешности средств измерений.....	116
3.3. Нормирование метрологических характеристик средств измерений .....	122
3.4. Классы точности средств измерений.....	127
3.5. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов .....	133
3.5. Погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации.....	138

3.6. Выбор средств измерений.....	147
3.7. Метрологическая надежность средств измерений .....	152
3.8. Методики выполнения измерений.....	156
<b>Г л а в а 4. Воспроизведение, хранение и передача размеров единиц величин .....</b>	<b>160</b>
4.1. Централизованное и децентрализованное воспроизведение единиц величин.....	160
4.2. Эталоны.....	161
4.2.1. Основные понятия об эталонах.....	161
4.2.2. Метрологическая классификация эталонов.....	163
4.2.3. Законодательная классификация эталонов .....	169
4.2.4. Хранение, применение и сличение эталонов .....	171
4.3. Квантовая метрология.....	177
4.4. Передача размеров единиц величин.....	186
4.4.1. Система передачи размеров единиц.....	186
4.4.2. Методы передачи размеров единиц .....	190
4.4.3. Поверочные схемы .....	193
<b>Приложения</b> .....	<b>220</b>
Приложение А .....	200
Приложение Б.....	208
Приложение В.....	215
Приложение Г.....	218
Приложение Д .....	219
Приложение Е.....	220
<b>Источники</b> .....	<b>223</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>226</b>
<b>Содержание</b> .....	<b>227</b>