

Белорусский национальный технический университет
Приборостроительный факультет
Кафедра «Стандартизация, метрология и информационные системы»

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

_____ П. С. Серенков

« ____ » _____ 2025 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета

_____ А.И. Свистун

« ____ » _____ 2025 г.

Электронный учебно-методический комплекс
по учебной дисциплине
«ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ»

Для выполнения курсового проектирования студентов специальности
6-05-0716-01 «Метрология, стандартизация и контроль качества»
(профилизация «Метрология, стандартизация и контроль качества в
машиностроении и приборостроении»)

Составитель: к.т.н., Коробко Ю.С.

м.т.н. Гомма М.А.

Рассмотрено и утверждено

На заседании совета приборостроительного
факультета протокол № 9 от 26.05.2025 г.

Минск
БНТУ
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Раздел I. ВЕЛИЧИНЫ КАК ИЗМЕРЯЕМЫЕ СВОЙСТВА	6
1 Метрология – наука об измерениях	6
1.1 Задачи метрологии	6
1.2 Современные направления развития метрологии	8
1.3 Международные метрологические организации	11
2 Физические величины и их единицы	15
2.1 Основные понятия метрологии.....	15
2.2 Системы величин и принципы их построения.....	17
2.3 Шкалы свойств и их применение в метрологии	19
2.4 Международная система единиц (SI).....	23
Раздел II. ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН	29
3 Измерение физических величин	29
3.1 Измерение как процесс получения информации об изм величине.....	29
3.2 Классификация измерений.....	31
4 Средства измерительной техники	40
4.1 Средства измерительной техники	40
4.2 Классификация средств измерений.....	41
4.3 Типовые конструктивные элементы	46
5 Погрешности измерений. Систематические погрешности	48
5.1 Погрешности измерений и их классификация.....	48
5.2 Систематические погрешности измерений	50
Раздел III. ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	52
6 Уменьшение и исключение систематических погрешностей	52
6.1 Методы выявления систематических погрешностей	52
6.2 Устранение систематических погрешностей	53
6.3 Специальные методы оценивания систематических погрешностей	57
7 Случайные погрешности измерений.....	60
7.1 Общие сведения.....	60
7.2 Оценки числовых характеристик измеряемой величины	63
7.3 Проверка принадлежности распределения к нормальному закону	67
7.4 Примеры законов распределения	68
8 Обнаружение грубых погрешностей. НСП	70
8.1 Метод обработки результатов многократных наблюдений.....	70
8.2 Обнаружение грубых погрешностей.....	70
8.3 Неисключенные систематические погрешности	72
9 Оценка результатов косвенных измерений	76

9.1	Определение действительных значений и погрешностей косвенных измерений.....	76
9.2	Частные случаи.....	79
9.3	Критерий ничтожных погрешностей	80
10	Метрологические характеристики средств измерений	82
10.1	Метрологические характеристики средств измерений	82
10.2	Погрешности СИ	83
10.3	Классы точности СИ	88
11	Основы концепции неопределённостей.....	90
11.1	Общие сведения.....	90
11.2	Классификация неопределенностей.....	91
11.3	Оценивание неопределенностей.....	93
Раздел IV. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....		103
12	Методики измерений и требования к ним.....	103
12.1	Основные понятия.....	103
12.2	Общие требования к разработке методик (методов).....	104
	измерений.....	104
12.3	Разработка и структура МВИ согласно требованиям ГОСТ 8.010.....	109
13	Эталоны единиц величин	113
13.1	Общие сведения.....	113
13.2	Виды эталонов	115
13.3	Соподчиненность эталонов.....	117
14	Метрологическая оценка	120
14.1	Понятие метрологической оценки.....	120
14.2	Поверочные схемы	123
14.3	Калибровка.....	128
15	Метрологическая прослеживаемость.....	129
15.1	Метрологическая прослеживаемость.....	129
15.2	Обеспечение единства измерений и метрологическая прослеж.	133
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ		135
ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....		138
Приложение А		139
Приложение Б		140
Приложение В.....		141
Приложение Г		143

ВВЕДЕНИЕ

Слово «метрология» базируется на двух древнегреческих корнях: μέτρον – мера и λόγος – учение и его перевод вполне соответствует термину «наука об измерениях». Как область практической деятельности метрология зародилась в древности. На всем пути развития человеческого общества измерения были основой отношений людей между собой, с окружающими предметами, природой. При этом вырабатывались единые представления о размерах, формах, свойствах предметов и явлений, а также правила и способы их сопоставления. Наименования единиц измерений и их размеры появлялись в давние времена. И чаще всего они воспроизводились тем, что как говорят, было «под руками и ногами». Например, мерами длины в 18 веке в России были: вершок (4,45 см), локоть 945 см), сажень (2,1336 м), косая сажень (2,48 м) и др. а в Англии и США до сих пор используются ярд (91 см) - расстояние от кончика носа короля Генриха I (жил почти 900 лет назад) до конца пальцев его вытянутой руки. Как видно, все они связаны с частями человеческого тела.

Однако уже в начале 1840 г. во Франции была введена метрическая система мер, в основу которой положено использование таких единиц, как килограмм и метр. Учеными было принято решение о том, что следует создать систему мер, основу которой будут составлять взятые из природы единицы. Суть такого подхода состояла в том, что таковые постоянно остаются неизменными, и поэтому стабильной будет и вся система в целом. Значимость метрической системы глубоко оценивал Д.И. Менделеев. В 1867 г. с трибуны съезда русских естествоиспытателей он выступил с призывом содействовать подготовке метрической реформы в России. По его инициативе Петербургская академия наук предложила учредить международную организацию, которая обеспечивала бы единообразие средств измерений в международном масштабе.

Для справки, Д.И. Менделеев руководил метрологией в период с 1892 по 1907 г. (менделеевское время в метрологии). В 1892 г. он возглавил первое государственное метрологическое учреждение России — Депо образцовых мер и весов, преобразовав его в уникальный научно-исследовательский центр мирового значения — Главную палату мер и весов (в настоящее время Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева). Менделеев говорил, что «Наука начинается... с тех пор, как начинают измерять». И это важнейший принцип развития науки, который не утратил актуальности и в современных условиях. 20 мая 1875 года на Дипломатической метрологической конференции, проведенной в Париже, в которой участвовали 17 государств (в том числе Россия), была принята Метрическая конвенция. Именно поэтому всемирный день метрологии отмечается 20 мая. Он учрежден Международным Комитетом мер и весов (МКМВ) в октябре 1999 года. А сам Международный комитет мер и весов учреждён в соответствии с Метрической конвенцией.

На данный момент Метрическая система мер используется в большинстве стран мира. Однако в Великобритании, США и Канаде применяется английская система мер, основанная на таких единицах, как фунт, фут и секунда. Эти страны

уже приняли несколько законодательных мер, направленных на переход к Метрической системе.

Долгое время метрология была в основном описательной наукой о различных мерах и соотношениях между ними. Но в процессе развития общества роль измерений возрастала, и с конца прошлого века метрология поднялась на качественно новый уровень.

В Беларуси создание самостоятельных метрологических учреждений началось лишь после революции и окончания гражданской войны. 29 февраля 1924 г. приказом Народного Комиссариата Финансов Беларуси № 47 на базе подотдела мер и весов Наркомфина БССР было основано первое в Беларуси метрологическое учреждение – Белорусская палата мер и весов, которая возглавила метрологическую службу в Республике.

Сегодня Республика Беларусь является членом многих международных организаций, направлением деятельности которых является метрология. Международное сотрудничество нашей республики в области метрологии играет заметную роль в процессах интеграции Беларуси в мировую экономику.

Раздел I. ВЕЛИЧИНЫ КАК ИЗМЕРЯЕМЫЕ СВОЙСТВА

1 Метрология – наука об измерениях

1.1 Задачи метрологии

Согласно РМГ 29–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения»

Метрология - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Здесь следует уточнить: измерять можно все – физические величины, уровень интеллекта, глубину художественного впечатления от некоторого зрелища, степень красоты чего-либо и многое другое. В результате метрологию смешивают с другими видами деятельности, например, квалиметрией – областью науки, занимающейся количественной оценкой качества объектов и их частных свойств. «Чистая» метрология занимается только вопросами измерения физических величин, характеризующих всевозможные материальные объекты, процессы или явления. На рис.1.1 схематично показаны возможные величины.



Рисунок 1.1 — Величины

Идеальные величины являются моделью реальных понятий и используются в основном в «чистой науке», например, в математике.

Реальные величины делятся на физические и нефизические.

Нефизические величины используются в нефизических науках — экономике, философии, социологии и т.п.

Физические величины делятся на **измеряемые** и **оцениваемые**.

Измеряемые физические величины могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Возможность введения и использования единиц измерения является отличительным признаком измеряемой физической величины.

Если для физической величины нельзя ввести единицу измерения, то она относится к **оцениваемым**.

Цель метрологии, как науки – достижение обеспечения единства измерений.

Единство измерений - состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Задачами метрологии являются:

- установление единиц физических величин, государственных эталонов;
- разработка теории, методов и средств измерений и контроля;
- обеспечение единства измерений;
- разработку методов определения точности измерений
- разработку методов передачи размеров единиц от эталонов рабочим средствам измерений.

Сегодня важная роль метрологии отводится повышению качества продукции.

Качество – это степень соответствия присущих характеристик продукции (услуги) требованиям. Обеспечение качества – одно из основных условий, при выполнении которого поставщик может выйти на рынок с конкурентоспособной продукцией (услугой). А составляющим элементом системы управления качеством на стадиях производства и реализации продукции выступает метрология, а именно **метрологическое обеспечение** производства. Измерения различных свойств товаров позволяет определить технические характеристики продукции. Соблюдение правил метрологии дает возможность свести к минимуму потери от недостоверных результатов измерений. Таким образом, измерение – одно из важных составляющих, входящих в процедуру контроля качества.

В соответствии с поставленными задачами, метрология подразделяется на теоретическую, законодательную и прикладную.

Теоретическая (фундаментальная) метрология - раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии. К основным задачам теоретической метрологии относятся:

- разработка научно-методических основ системы;
- организация и проведение научных исследований по использованию новейших достижений науки и техники с целью создания и совершенствования методов и средств измерений высшей точности и определения значений физических констант;
- установление допускаемых к применению единиц величин;
- разработка методик оценивания погрешностей и неопределенностей измерений и обеспечения требуемой точности;
- установление значений физических констант, получение и стандартизация данных, характеризующих свойства веществ и материалов;
- разработка методов и средств измерений;
- разработка и аттестация методик (методов) измерений;

Кроме того, теоретическая метрология работает над общими проблемами, возникающими при выполнении измерений в той или иной области техники, гуманитарных наук, а то и на стыке многих, иногда самых разноплановых областей знаний. Так или иначе, практически любое начинание в какой-либо деятельности,

в том числе и метрологии, начинается с теории и лишь после переходит в сферу практического применения.

Законодательная метрология – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и требуемой точности измерений. Законодательная метрология призвана обеспечить единый подход к измерениям, выполняемых во всех областях деятельности. Она непосредственно граничит со стандартизацией, обеспечивающей совместимость технологий, средств измерения и прочих понятий метрологического обеспечения. Область интересов законодательной метрологии включает также работу с эталонами величин измерения, вопросы поверки и калибровки средств измерений, подготовку специалистов-метрологов и многие другие вопросы. Основным правовым документом, регулирующим деятельность в этой сфере, является закон РБ «Об обеспечении единства измерений».

Прикладная (практическая) метрология – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии. Прикладная метрология занимается вопросами метрологического обеспечения, использования на практике разработок теоретической метрологии, внедрения положений законодательной метрологии. Её задача состоит в адаптации общих положений теоретической и законодательной метрологий к производственной или научной деятельности.

1.2 Современные направления развития метрологии

Сегодня метрология глубоко проникла во все области науки, техники, производства и жизни человека, обеспечивая точный контроль, достоверные измерения. Повсеместно возрастают потребности в точных, надежных и сопоставимых результатах измерений. Сегодня основными направлениями развития метрологии являются следующие.

1). Безопасность продуктов питания.

Продовольственный кризис, связанный с ростом населения Земли, способствует развитию генной инженерии, модифицированных продуктов. Возникает вопрос - безопасны ли потребляемые нами продукты? Международные промышленные ассоциации проявляют все большую заинтересованность в получении более сопоставимых и точных результатов измерений.

2). Предотвращение технических барьеров в торговле.

Возрастает количество отказов от продовольственных товаров импортирующими странами вследствие непринятия результатов измерений и испытаний, выполненных экспортирующими странами, или полного отсутствия каких-либо результатов измерений и испытаний. Отсутствие признанных на международном уровне и прослеживаемых результатов измерений и испытаний ставит развивающиеся страны в очень непрочное и зависимое положение

относительно импортирующих развитых стран. Так, примерами отвергнутых продуктов являются

- рыба, овощи и фрукты из Африки в ЕС и США,
- вино, рыба, креветки из Чили в США и ЕС,
- говядина и мед из Аргентины,
- лосось, устрицы, китайские лекарственные средства в Гонконг и другие страны мира,
- тайские цыплята в Европу и т.д.

Финансовые потери в этих случаях значительны, так как часто эти продукты просто уничтожаются, а не возвращаются поставщику. Торговля между развитыми странами иногда также затруднена из-за отсутствия признанной на международном уровне метрологической системы, в частности, в таких областях физических измерений, как цвет, блеск, свойства веществ. Все чаще признается, что метрология в химии во многих странах еще находится в начальной фазе развития и реализации.

3). Мониторинг окружающей среды.

Контроль за изменением климата требует очень точных измерений (для парниковых газов и озона – выше 0,1%) с использованием исходных эталонов, обладающих долговременной стабильностью, которые позволяют определить небольшие изменения в течение значительных периодов времени.

Результаты измерения солености океанской воды рассматриваются как отличные индикаторы землетрясений, цунами и изменений климата.

Контроль мутности воды способствует принятию достоверных решений относительно качества питьевой воды. Для этого требуется точный электрохимический анализ.

Анализ воды, рыбопродуктов, устриц, креветок и других живых организмов позволяет обнаружить изменения в генной системе и протеинах, что является надежным индикатором качества окружающей среды. Поэтому необходима долговременная сопоставимость результатов измерений.

Точные измерения играют важную роль в сфере торговли энергией или квотами на загрязняющие вещества. Например, согласно Киотскому договору, квоты CO₂ могут обмениваться между странами, кроме того, идет оживленная торговля отходами. Отходы всех видов, включая промышленные отходы, выхлопные газы, выбросы из дымовых труб, использованные персональные и медицинские средства ухода, мусор оказываются в прибрежных водах.

4). Медицина

Лабораторный контроль. Необходим более точный и сопоставимый клинический анализ для всех пациентов, независимо от того, в какой стране, больнице или даже в каком отделении больницы они проходят лечение. Пациенту должно быть предоставлено своевременное и правильное лечение, исключающее ошибочные и необоснованно повторяющиеся измерения, что позволит пациентам сэкономить огромные суммы денег.

Антидопинговый контроль. Всемирное антидопинговое агентство - международная организация, созданная Международным комитетом, для контроля за спортсменами. В 2005 году было организовано первое сличение нандролонa,

чтобы повысить сопоставимость и надежность результатов. Это позволит лучше разрешать споры и разбирательства по поводу проб, взятых на проверку у спортсменов.

Онкология. Для лечения трети всех раковых пациентов применяется радиотерапия. Ключом к выздоровлению является подача в опухоль необходимой дозы радиоактивного излучения: если она слишком мала – лечение будет неэффективным, слишком высокая доза или неточное позиционирование излучения оказывают на пациента нежелательные и неприятные побочные эффекты. Следовательно, измерения дозы радиации, производимой медицинским оборудованием, способствуют развитию этого вида лечения.

Гемодиализ. Фундаментальные исследования в области измерений электрической проводимости оказывают непосредственное влияние на качество жизни пациентов, нуждающихся в диализе.

Также необходимо создать и согласовать на международном уровне эталоны, обеспечивающие прослеживаемость измерений ДНК и РНК, лекарственным препаратам, ядам, взрывчатым и другим веществам в малых количествах.

5). Энергосбережение

Новые виды источников энергии. Создание водородных и других топливных батарей, применение биотоплива и атомной энергии требуют создания новых и более точных измерительных систем.

А разработка и установка электрических счетчиков с дистанционным управлением требуют применения сложных систем с хранением и передачей данных.

Возросший в некоторых странах интерес к ядерной энергии и ведущиеся в настоящее время исследования в области ядерных технологий требуют создания современных эталонов радиоактивности и ионизирующего излучения, а также измерений в нейтронных полях.

6). Безопасность

Измерения отпечатков пальцев, почерковедческая экспертиза являются перспективной областью метрологии, что вызвано объективной необходимостью предупреждения терактов и взрывов.

Меры безопасности в аэропортах и других местах основаны на применении методов контроля, использующих ионизирующее излучение, электромагнитное излучение, тепловое излучение и т.д. Так как любое излучение наносит вред здоровью человека, его уровни должны контролироваться.

Досмотр багажа, таможенный контроль (рамочные мониторы для обнаружения радиоактивных материалов и наркотиков, хранящихся в грузовых контейнерах) предполагают решение проблемы безопасности операторов, работающих с этим оборудованием, а также лиц и материалов, подвергающихся контролю.

Безопасность дорожного движения. Безопасность на дорогах зависит не только от исправности транспортного средства, так же не стоит исключать и человеческий фактор. В связи с этим можно выделить следующее оборудование, нуждающееся в метрологическом контроле.

7). Информационные технологии.

Для дистанционного считывания в торговле (информация со счетчиков) и в здравоохранении (в отделениях интенсивной терапии) требуются надежные датчики и информационные технологии.

Разрабатываются биометрические системы. Развиваются системы беспроводной передачи данных.

Проблема обеспечения точности, скорости и синхронности работы коммуникационных систем. Для этого необходима точность синхронизации временных шкал.

Навигационные измерения позволяют регулировать транспортные потоки, повышая безопасность в густонаселенных районах.

Применение спутниковых систем требует использование точных сличений времени и частоты.

8). Инновации. Нанометрология

Тенденция к миниатюризации электронных элементов предполагает очень точные измерения на микро- и нано- уровнях. Области науки, объединяемые единым понятием «нанометрология», фактически подразумевают широкую междисциплинарную сферу деятельности, к которой относят все виды измерений на наноуровне.

Измерения взвешенных в воздухе наночастиц в окружающей среде и на рабочем месте могут помочь улучшению качества воздуха и охране здоровья людей.

1.3 Международные метрологические организации

Международные метрологические организации - организации, созданные на основе международных соглашений для осуществления и хранения основных единиц физических величин и для достижения международного единства мер. В международные организации по метрологии входят представители национальных организаций по метрологии. Представим наиболее влиятельные метрологические организации и сферы их деятельности.

В 1975 г. было создано первое международное метрологическое учреждение - **Международное бюро мер и весов (МБМВ)**, которое активно функционирует до наших дней. Бюро координирует деятельность метрологических организаций более чем 100 стран, в том числе и Беларусь (с 2020 г.).

Международное бюро мер и весов создано по решению Дипломатической конференции и на основании метрической конвенции с целью унификации национальных систем единиц измерения и установления единых эталонов длины и массы (метр и килограмм). Эта международная организация располагается во Франции в г. Севр. Цель МБМВ - создание, хранение и воспроизведение "ключевых" международных эталонов единиц физических величин, а также поверка по ним национальных эталонов. Руководство деятельностью МБМВ

осуществляется **Международным комитетом мер и весов** (МКМВ). Логотип этой организации представлен на рис. 1.2.



**Международное Бюро
мер и весов (МБМВ)
Le bureau International
des Poids et Mesures**

Рисунок 1.2 — Логотип Международного бюро мер и весов

Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) учреждена на основе межправительственной Конвенции, подписанной в 1956г. Организация объединяет более 80 государств мира в том числе и Беларусь (с 1993 г.).

Цель МОЗМ - разработка общих вопросов законодательной метрологии, в том числе установление классов точности средств измерений; обеспечение единообразия определения типов, образцов и систем измерительных приборов; рекомендации по их испытаниям для унификации метрологических характеристик; порядок поверки и калибровки средств измерений; гармонизация поверочной аппаратуры, методов сличения, поверок и аттестации эталонов; выработка оптимальных форм организации метрологических служб и обеспечение единства государственных предписаний по их ведению; оказание научно-технического содействия развивающимся странам в создании и организации работ метрологических служб и их оснащение надлежащим оборудованием; установление единых принципов подготовки кадров в области метрологии. Логотип этой организации представлен на рис. 1.3.



**Международная
организация
законодательной
метрологии (МОЗМ)
International Organization
of Legal Metrology**

Рисунок 1.3 — Логотип Международной организации законодательной метрологии

Международная конфедерация по измерительной технике и приборостроению (ИМЕКО) 1958 г. Занимается вопросами измерений в сфере науки и техники. Участвует в ней 36 стран.

Целью ИМЕКО является содействие международному сотрудничеству и обмену научной и технической информацией в области измерительной техники. Форма ее работы - проведение международных конгрессов и семинаров по актуальным проблемам развития измерительной и диагностической техники. Логотип этой организации представлен на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 — Логотип Международной конфедерации по измерительной технике и приборостроению

КОOMET – организация сотрудничества государственных метрологических учреждений стран Центральной и Восточной Европы, был создан в июне 1991 года, в мае 2000 года переименован в "Евро-азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений" (для упрощения вступления в КОOMET заинтересованных организаций не только европейских, но и азиатских стран). Основой деятельности КОOMET является сотрудничество в следующих областях: эталоны физических величин, законодательная метрология, аккредитация и системы менеджмента качества, информация и обучение. Логотип этой организации представлен на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 — Логотип Организации сотрудничества государственных метрологических учреждений стран Центральной и Восточной Европы

Международная электротехническая комиссия (МЭК) 1906 г. Является ведущей международной организацией по разработке и публикации международных стандартов.

Основная цель организации - содействие международному сотрудничеству по стандартизации и смежным с ней проблемам в области электротехники и радиотехники путем разработки международных стандартов и других документов. Республика Беларусь является полноправным членом МЭК с 1993 года. Логотип этой организации представлен на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 — Логотип Международной электротехнической комиссии

2 Физические величины и их единицы

2.1 Основные понятия метрологии

Метрология - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами, которые могут поддаваться количественной оценке. Например, две авторучки отличаются друг от друга своей длиной и массой. Или одна электрическая схема отличается от другой силой тока, протекающей в ней. Для качественной оценки свойств явлений и материальных объектов вводится понятие «**физическая величина**».

Физическая величина (величина; ФВ) - свойство материального объекта или явления, общее в качественном отношении для многих объектов или явлений, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Свойство – философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами). Свойство – категория качественная.

Примеры ФВ: сила электрического тока, температура, масса тела, длина, и т.п. Эти свойства для одного объекта могут быть в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

Для выражения количественного различия между одноименными величинами используются понятия размер ФВ и числовое значение ФВ.

Размер ФВ - количественная определенность величины, присущая конкретному материальному объекту или явлению.

Размер, это понятие, выражающее количественное различие между одноименными величинами. Размер ФВ существует объективно, независимо от того, знаем мы его или нет, можем измерить или нет. Именно целью измерений является определение размера ФВ. Причем результат измерения должен выражаться числом.

Значение ФВ - выражение размера величины в виде некоторого числа принятых единиц, или чисел, баллов по соответствующей шкале измерений.

Обозначим: A – размер ФВ; a – значение одноименной величины, размер которой принят за единицу; q – числовое значение ФВ. Тогда можно записать:

$$A = qa.$$

Числовое значение ФВ – отвлеченное число, входящее в значение величины.

Размерность ФВ - выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных величин в различных степенях и отражающее связь данной величины с величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

Иными словами, размерность ФВ – выражение, отражающее связь ФВ с основными величинами системы ФВ, в котором коэффициент пропорциональности равен 1.

$$\text{Dim } Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma \dots,$$

где L, M, T... – символы основных физических величин;

$\alpha, \beta, \gamma \dots$ – показатели степени.

Например, уравнение связи для скорости V определяется как:

$$V = L/T.$$

Уравнение связи (между величинами) - математическое соотношение между величинами в данной системе величин, основанное на законах природы и не зависящее от единиц измерения.

Размерность скорости согласно определению записывается как:

$$\text{dim } V = LT^{-1}.$$

Измерение ФВ – процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине. Измерить ФВ – найти ее значение опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений (СИ).

Истинное значение ФВ Q – значение величины, которое соответствует определению измеряемой величины. Истинное значение характеризует количественно размер измеряемой величины и существует объективно, независимо от процесса измерения. Истинное значение обычно неизвестно. На практике обычно его заменяют действительным значением.

Действительное значение ФВ X_d - значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. В качестве действительного значения часто используют измеренное значение величины.

Измеренное значение ФВ X – значение величины, которое представляет результат измерения. Измеренное значение получается в результате измерения.

Опорное значение ФВ – значение величины, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода. Опорное значение величины может быть истинным значением величины, подлежащей измерению (в этом случае оно неизвестно), или принятым значением величины (в этом случае оно известно, например, при калибровке). Иными словами, если ФВ подлежит измерению, то она неизвестна, значит и опорное значение неизвестно. В этом случае опорное значение ФВ является истинным значением.

Результат измерения ФВ – множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной

информацией. Например, результат измерения может быть представлен измеренным значением величины X с указанием соответствующего показателя точности.

Погрешность измерения Δ - разность между измеренным значением величины и опорным значением величины. Если в качестве опорного значения выступает истинное значение ФВ, которое неизвестно, то значение погрешности тоже неизвестно. В этом случае погрешность измерения Δ определяется как разность результата измерения X и истинного Q (действительного) значения измеряемой величины.

$$\Delta = X - Q.$$

Таким образом, измеренное значение X отличается от истинного значения Q на величину погрешности измерения Δ :

$$X = Q + \Delta.$$

Также существует понятие относительной погрешности измерения:

$$\delta = \Delta / Q \approx \Delta / X_{\delta} \approx \Delta / X.$$

Часто ее выражают в процентах:

$$\delta = \Delta / Q \cdot 100 \text{ \%}.$$

2.2 Системы величин и принципы их построения

Понятие «величина», например, в математике связывают с числом. В метрологии это понятие имеет принципиально иное значение, из-за чего иногда возникают недоразумения и путаница. В метрологии физическая величина одно из свойств физического объекта (либо явления), его характерный признак, который может выделяться качественно и определяться количественно, т.е. подлежать измерению. Числовые значения измеряемых величин зависят от того, какие используются единицы измерений.

Единица измерения ФВ – величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное 1, определяемая и принимаемая по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин.

Роль единиц измерения очень велика. Если будет произвол в выборе единиц, то результаты измерений окажутся несопоставимы между собой, т. е. нарушится единство измерений.

Единство измерений - состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Чтобы этого не произошло, единицы измерений устанавливаются по определенным правилам и закрепляются законодательным путем. Это задача законодательной метрологии. Создаются системы единиц величин.

Система величин - согласованная совокупность величин и уравнений связи между ними, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины условно принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин. Выбранные независимые величины называют основными. В качестве основных выбирают величины, которые характеризуют фундаментальные свойства материального мира. Прочие величины, получаемые с их использованием, называют производными.

Исторически первой системой единиц физических величин была принятая в 1791 г. Национальным собранием Франции метрическая система мер. Она не являлась еще системой единиц в современном понимании, а включала в себя единицы длин, площадей, объемов, вместимостей и веса, в основу которых были положены две единицы: метр и килограмм.

В 1832 г. немецкий математик Карл Фридрих Гаусс предложил методику построения системы единиц как совокупности основных и производных. Он построил систему единиц, в которой за основу были приняты три произвольные, независимые друг от друга единицы длины, массы и времени. Все остальные единицы можно было определить с помощью этих трех. Такую систему единиц, связанных определенным образом с тремя основными, Гаусс назвал абсолютной системой. За основные единицы он принял миллиметр, миллиграмм и секунду.

В дальнейшем с развитием науки и техники появился ряд систем единиц физических величин, построенных по принципу, предложенному Гауссом, базирующихся на метрической системе мер, но отличающихся друг от друга основными единицами. Вот примеры некоторых систем единиц физических величин.

Система СГС (сантиметр-грамм-секунда) или МТС (метр-тонна-секунда). Основными единицами являются сантиметр как единица длины, грамм как единица массы и секунда как единица времени, была установлена в 1881 г. (для механики).

Система МКГСС. Применение килограмма как единицы веса, а в последующем как единицы силы вообще, привело в конце XIX века к формированию системы единиц физических величин с тремя основными единицами: метр - единица длины, килограмм-сила единица - силы и секунда - единица времени.

Система МКСА. Основы этой системы были предложены в 1901 г. итальянским ученым Джорджи. Основными единицами системы МКСА являются метр, килограмм, секунда и ампер (механика, электрика).

Наличие ряда систем единиц физических величин, а также значительного числа внесистемных единиц, неудобства, связанные с пересчетом при переходе от одной системы единиц к другой (что часто приводило к механическим ошибкам), требовало унификации единиц измерений в международном масштабе. Требовалась единая система единиц физических величин, практически удобная и охватывающая различные области измерений. При этом она должна была

сохранить принцип когерентности (равенство единице коэффициента пропорциональности в уравнениях связи между физическими величинами). Наряду с этим не отрицается возможность создания специальных систем единиц для конкретных узких областей.

2.3 Шкалы свойств и их применение в метрологии

В практической деятельности необходимо проводить измерения количественных и качественных свойств объектов, явлений и процессов. Особенности измерений любых свойств могут быть учтены применением для их оценки соответствующих шкал.

Шкала измерений - отображение множества различных проявлений качественного или количественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений). По латыни *skala* – лестница. Таким образом, шкалой величины (шкалой измерений) называют упорядоченную совокупность значений величины, служащую исходной основой для измерения данной величины.

Различают пять типов шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные.

Шкала наименований

Шкалы наименований представляет собой конечный набор обозначений для никак не связанных между собой состояний (свойств) объекта. В шкалах наименований нельзя ввести понятие единицы измерения, в них отсутствует и нулевой элемент. Такая шкала может содержать любые знаки (числа, наименования, другие условные обозначения).

Примерами таких шкал является шкала классификации (оценки) цвета объектов по наименованиям (красный, оранжевый, желтый, зеленый и т. д.), опирающаяся на стандартизованные атласы цветов, систематизированные по сходству. В таких атласах, выполняющих роль своеобразных эталонов, цвета могут обозначаться условными номерами (координатами цветами). Измерения в шкале цветов выполняются путем сравнения при определенном освещении образцов цвета из атласа с цветом исследуемого объекта и установления эквивалентности их цветов.

В бытовом плане шкалами наименований являются списки фамилий, личных номеров в документах, адресов, номеров ссылок на литературные источники.

Шкалы наименований качественны. Однако возможны некоторые статистические операции при обработке результатов измерений в этих шкалах, например, можно найти наиболее многочисленный класс эквивалентности.

Шкала порядка

Шкалы порядка описывают свойства, для которых имеют смысл не только соотношения эквивалентности, но и соотношения порядка по возрастанию или

убыванию количественного проявления свойства. В отличие от шкалы наименований, шкала порядка устанавливает фиксированный порядок расположения объектов в соответствии с уровнем интенсивности рассматриваемого свойства. В этих шкалах также нет возможности ввести единицы измерений, но в них может быть или отсутствовать нулевой элемент. Шкалы порядка описывают свойства, для которых имеют смысл не только соотношения эквивалентности, но и соотношения порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства.

Характерным примером шкал порядка являются существующие шкалы чисел твердости тел, шкалы баллов землетрясений, шкалы баллов ветра, октановые числа топлива для двигателей и т. п. На рисунке 2.1 приведена шкала твердости Мооса.

Минерал	Твёрдость
Тальк	1
Гипс	2
Кальцит	3
Флюорит	4
Апатит	5
Ортоклаз	6
Кварц	7
Топаз	8
Корунд	9
Алмаз	10

Рисунок 2.1 — Шкала твердости Мооса

Также примерами порядковых шкал могут служить шкалы:

- при определении мест команд или спортсменов в ходе соревнований;
- определения рейтингов деятелей искусства или политиков;
- построения группы людей по росту, где каждый последующий ниже всех предыдущих;
- балльных оценок знаний обучающихся на экзаменах;
- ранжированных классы точности приборов (область метрологии);
- разрядов эталонных средств измерений (1, 2, 3 и т.д.) (область метрологии).

Шкала интервалов

Шкалы интервалов (иногда их называют шкалами разностей) отличаются от шкал порядка тем, что положение точки на любой ступени шкалы интервалов жестко определено и соотношения координат точек шкалы поддаются расчету в соответствии с закономерностью построения шкалы. Для неё не существует естественного начала отсчёта.

Примерами шкал интервалов могут служить периоды работы, периоды учебы. Их можно складывать и вычитать.

Еще один пример - шкала Цельсия. Она была установлена следующим образом: за ноль была принята точка замерзания воды, за 100 градусов - точка её кипения, и, соответственно, интервал температур между замерзанием и кипением воды поделен на 100 равных частей (рис.2.2).

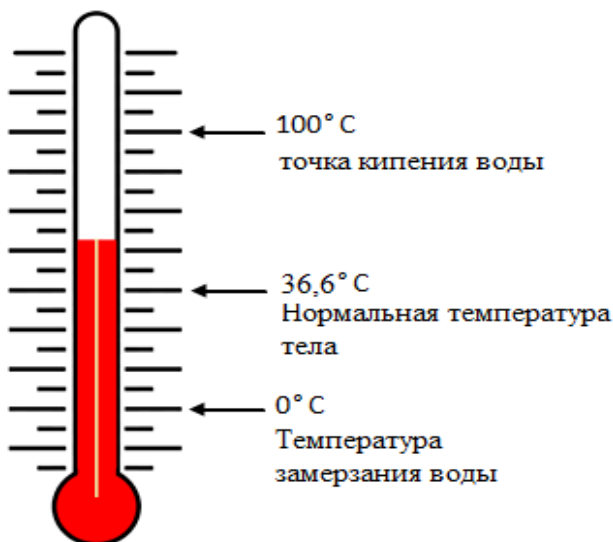


Рисунок 2.2 — Температурная шкала Цельсия

Недостатком шкалы интервалов является неопределенность начала (нуля), которое устанавливается условно. Такой условностью на шкалах времени являются, к примеру, моменты начала летоисчисления (2025 год от рождества Христова одновременно приходится на 5786 год по иудейскому календарю). Тем не менее, в сутках у всех 24 часа, а в году 365 суток, если год не високосный.

Шкала отношений

Шкала отношений строится аналогично шкале интервалов, но имеет фиксированный (естественный) ноль (рис.2.3).

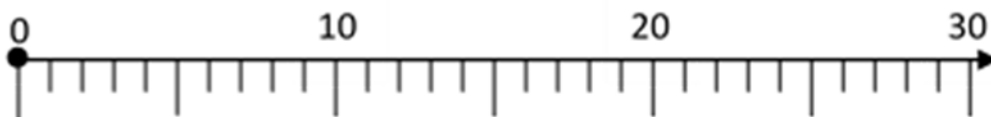


Рисунок 2.3 — Шкала отношений

Шкала отношений - самая мощная шкала. Она позволяет оценивать, во сколько раз один измеряемый объект больше (меньше) другого объекта, принимаемого за эталон, единицу. Такая шкала полностью соответствует математической шкале чисел по определенности ступеней и возможностям оперирования элементами шкалы. Шкалами отношений измеряются почти все физические величины.

Абсолютная шкала

Абсолютная шкала является частным случаем шкалы отношений, но кроме фиксированной нулевой точки имеет еще и «естественную единицу». Характерным примером такой шкалы является абсолютная температурная шкала Кельвина (рис.2.4). К абсолютным шкалам также можно отнести шкалу коэффициента полезного действия, шкалу относительной влажности и другие им подобные.



Рисунок 2.4 — Абсолютная температурная шкала Кельвина

Шкалы эволюционируют. Пример - эволюций температурных шкал. Вначале - создание шкал **наименований** базировалось на последовательном разделении понятий «температура» и «теплота». Затем на различении степени нагретости тел по шкале **порядка** (холодное-теплое-горячее). Затем приобрела множество **интервальных** шкал с несовпадающими нулями и единицами (шкалы Реомюра, Фаренгейта, Цельсия). Наконец, пришла к логически завершенной **абсолютной** термодинамической шкале Кельвина с абсолютным нулем.

Шкалы средств измерений

Шкала измерительного прибора или штриховой меры является конструктивным элементом средства измерений, отображающим ограниченный участок теоретической шкалы измеряемой физической величины. Шкала средства измерений конкретна и характеризуется верхним и нижним пределами, ценой деления, длиной деления и др. Операция нанесения шкалы на средство измерений называется градуировкой и может осуществляться на основании теоретических расчетов, либо по результатам измерений физических величин и т.п. На рис.2.5 в качестве примера показана шкала мультиметра Ц4315

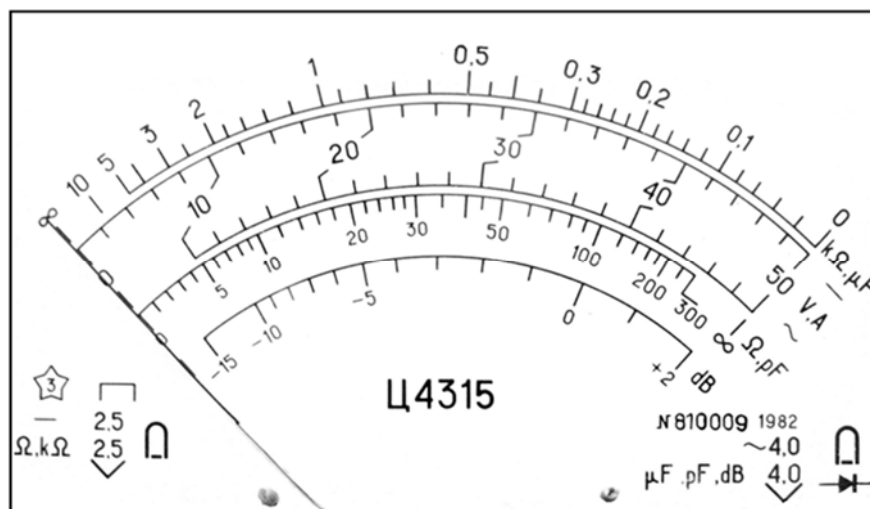


Рисунок 2.5 — Шкала мультиметра Ц4315

2.4 Международная система единиц (SI)

В 1956 году Международным комитетом по мерам и весам была разработана Международная система единиц ФВ, сокращенное название которой SI (фр. *Système international d'unités*). Она охватывает все области науки, техники, народного хозяйства. Первым шагом на пути к ее созданию можно считать разработку десятичной метрической системы, основанной на использовании архивного метра и килограмма, изготовленных во Франции в 1799 году. 20 мая 1875 года семнадцать странами была подписана Метрическая конвенция «для обеспечения международного единства и усовершенствования метрической системы», учреждено Международное бюро мер и весов, началась работа по созданию новых международных прототипов для метра и килограмма. В 1889 году на I Генеральной конференции по мерам и весам были утверждены международные прототипы для метра и килограмма. Вместе с астрономической секундой как единицей времени, эти единицы составили трехмерную механическую систему единиц, с основными единицами метр, килограмм и секунда. В 1939 году была принята четырехмерная система, предложенная Д. Джорджи, основанная на метре, килограмме, секунде и ампере. В 1960 году XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла единую Международную систему единиц, дала определение основных единиц этой системы и предписала употребление некоторых производных единиц. В настоящее время она принята в качестве законной системы единиц измерения большинством стран мира, за исключением США, Мьянмы (Бирмы) и Либерии. В Республике Беларусь единицы SI указаны в Положении о допуске единиц величин к применению в Республике Беларусь (утверждено Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 24.11.2020 № 673), а также в межгосударственном стандарте ГОСТ 8.417-2002 «ГСИ. Единицы физических величин». В таблице 2.1 приведены основные единицы Международной системы единиц физических величин.

Таблица 2.1 — Международная система физических единиц

Основные единицы системы SI			
Величина		Единица	
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Основные			
Длина	<i>L</i>	метр	m/m
Масса	<i>M</i>	килограмм	кг/kg
Время	<i>T</i>	секунда	s/s
Сила электрического тока	<i>I</i>	ампер	A/A
Термодинамическая температура Кельвина	Θ	кельвин	K/K
Сила света	<i>J</i>	кандела	кд/cd
Количество вещества	<i>N</i>	моль	моль/mol

Производные единицы образуются из основных единиц SI по правилам образования когерентных производных единиц SI на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или математических формул. Производные единицы SI могут быть использованы для образования других производных единиц SI.

В зависимости от отношения с основной единицей различают дольные и кратные единицы, образованные умножением основной единицы на десять в целой положительной или отрицательной степени (в SI приняты модули показателей 1, 2, 3, и далее через 3 до 24). Дольная единица – единица измерения, в целое число раз меньшая данной единицы. Кратная единица – единица измерения, в целое число раз большая данной единицы. При образовании кратных и дольных единиц к основным единицам добавляют приставки, наименования и обозначения которых приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц СИ

Множитель	Приставка СИ			
	Наименование		Обозначение	
	русское	международ.	русское	международ.
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{24}$	йотта	yotta	И	Y
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{21}$	зетта	zetta	З	Z
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{18}$	экса	exa	Э	E
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{15}$	пета	peta	П	P
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	tera	Т	T
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гига	giga	Г	G
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мега	mega	М	M
$1\ 000 = 10^3$	кило	kilo	к	k
$100 = 10^2$	гекто	hecto	г	h
$10 = 10^1$	дека	deca	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	deci	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санти	centi	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	милли	milli	м	m
$0,000\ 001 = 10^{-6}$	микро	micro	мк	μ
$0,000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	нано	nano	н	n
$0,000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	пико	pico	П	P
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$	фемто	femto	ф	f
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$	атто	atto	а	a
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-21}$	zepto	zepto	з	z
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-24}$	йокто	yocto	и	Y

Международная система единиц имеет ряд достоинств, таких как: универсальность (обеспечивает ее применение во всех отраслях производства и областях науки); унификацию единиц физических величин; унификацию механизма образования дольных и кратных единиц; когерентность системы.

Международная система единиц когерентна. Ее когерентность заключается в том, что производные единицы получают из основных с коэффициентом в виде неименованной единицы. Например, единица скорости 1 м/с образована делением единицы длины 1 м на единицу времени 1 с, единица давления 1 Па, образована делением единицы силы 1 Н на единицу площади 1 м², которая в свою очередь образована произведением единиц длины 1 м на 1 м.

Основные единицы международной системы единиц имеют международные эталоны.

Эталон единицы величины - средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений.

Международный эталон - эталон, который признан всеми государствами, подписавшими международное соглашение, и предназначен для всего мира.

Международный эталон метра определяется как длина пути, проходимая светом в вакууме за интервал времени $1/299792458$ с.

Международный эталон килограмма определяется постоянной Планка, поделенной на $6,626070040 \times 10^{-34} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Международный эталон секунды равна 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Международный эталон Ампера определяется как электрический ток, соответствующий потоку $1/1,6021766208 \times 10^{-19}$ элементарных электрических зарядов в секунду.

Международный эталон Кельвин соответствует изменению тепловой энергии на $1,38064852 \times 10^{-23}$ джоулей. Для выражения единицы требуется постоянная Больцмана.

Международный эталон моль определяется как количество вещества системы, которая содержит $6,022140857 \times 10^{23}$ специфицированных структурных единиц. Для выражения единицы требуется постоянная Авогадро (число Авогадро).

Международный эталон кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540×10^{12} Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 ватт/стерадиан.

В таблице 2.3 приведены некоторые производные единицы международной системы единиц, имеющие специальные названия.

Наряду с единицами СИ допускается применение внесистемных единиц.

Внесистемная единица – единица величины, не входящая в принятую систему единиц. Различают внесистемные единицы:

- 1). Допускаемые к применению наравне с единицами СИ.
- 2). Допускаемые к применению в специальных областях.
- 3). Временно допускаемые к применению.
- 4). Устаревшие (не допускаемые к применению).

Например, к внесистемным можно отнести единицы, которые не входят в СИ, а также единицы, заимствованные из других систем:

дюйм, фут, миля, калибр, карат;

минута-час-сутки;

градусы Цельсия;

угловые градусы, угловые минуты, угловые секунды;

тонна, световой год, парсек.

Таблица 2.3 — Производные единицы SI, имеющие специальные названия

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Выражение через единицы СИ
Частота	T^{-1}	герц	Гц	s^{-1}
Сила, вес	$LM T^{-2}$	ньютон	Н	$mkgs^{-2}$
Давление, механическое напряжение	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па	$m^{-1}kgs^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж	m^2kgs^{-2}
Мощность	L^2MT^{-3}	ватт	Вт	m^2kgs^{-3}
Количество электричества	TI	кулон	Кл	sA
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	В	$m^2kgs^{-3}A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	Ф	$m^{-2}kg^{-1}s^4A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ом	$m^2kgs^{-3}A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	См	$m^{-2}kg^{-1}s^3A^2$
Поток магнитной индукции	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб	$m^2kgs^{-2}A^{-1}$
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл	$kgs^{-2}A^{-1}$
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн	$m^2kgs^{-2}A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	лм	$cdsr$
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	лк	$m^{-2}cdsr$
Активность радионуклида	T^{-1}	беккерель	Бк	s^{-1}
Поглощенная доза ионизирующего излучения	L^2T^{-2}	грей	Гр	m^2s^{-2}
Эквивалентная доза излучения	L^2T^{-2}	зиверт	Зв	m^2s^{-2}

Кроме того, широко используются также внесистемные относительные, относительные логарифмические и условные единицы.

Относительные единицы:

процент, % - это 10^{-2} , сотая доля;
 промиле, ‰ - 10^{-3} , тысячная доля;
 миллионная доля, млн⁻¹(ppm) - 10^{-6} .

Относительные логарифмические единицы.

Относительные логарифмические единицы образуются следующим образом: пусть Y – ФВ, Y_0 – ее исходный уровень, a – постоянное число больше единицы. Тогда относительное изменение ФВ можно выразить в виде степени числа a .

$$\frac{Y}{Y_0} = a^x; \quad x = \log_a \frac{Y}{Y_0}.$$

Обычно $a = 10$; $a = e = 2,718$, $a = 2$. Если необходимы более мелкие логарифмические единицы, выбирают основание a более близким к единице, например $a = \sqrt[10]{10}$ или $a = \sqrt[1200]{2}$. Ниже приведены некоторые разновидности логарифмических единиц.

1). $a = 10$ (для энергетических ФВ)

$$x = \lg \frac{Y}{Y_0}, \quad \text{Бел (Б)}.$$

2). $a = \sqrt{10}$ (для силовых ФВ)

$$x = 2 \lg \frac{Y}{Y_0}, \quad \text{Бел (Б)}.$$

3). $a = \sqrt[10]{10}$ Более мелкие логарифмические единицы
(для энергетических ФВ)

$$x = 10 \lg \frac{Y}{Y_0} \quad \text{децибел (дБ)}.$$

4). $a = \sqrt[20]{10}$ Более мелкие логарифмические единицы
(для силовых ФВ)

$$x = 20 \lg \frac{Y}{Y_0} \quad \text{децибел (дБ)}.$$

5). $a = e^2$ (для энергетических ФВ)

$$x = 0.5 \ln \frac{Y}{Y_0} \quad \text{Непер (Нп)}$$

6). $a = e$ (для силовых ФВ)

$$x = \ln \frac{Y}{Y_0} \quad \text{Непер (Нп)}$$

Раздел II. ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН

3 Измерение физических величин

3.1 Измерение как процесс получения информации об измеряемой величине

Предметом изучения метрологии являются измерения физических величин, или физические измерения. Измерения - инструмент познания объектов и явлений окружающего мира. Объектами измерений являются физические объекты и процессы, протекающие в окружающей среде.

Объект измерения - материальный объект или явление, которые характеризуются одной или несколькими измеряемыми и влияющими величинами.

Измерение – процесс экспериментального получения одного или более количественных значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине;

Данное определение предусматривает описание ФВ в соответствии с предполагаемым использованием результата измерения, методики измерений и средства измерений, функционирующее в соответствии с регламентированной методикой измерений, а также с учетом условий измерений.

В более общем случае измерением называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств, которые называются средствами измерений (СИ).

Измерения весьма разнообразны, что объясняется множеством измеряемых величин, различным характером их изменения во времени, различными требованиями к точности измерений и т. д. Основное уравнение измерения физической величины представляется как:

$$Q = Nq,$$

где Q – истинное значение измеряемой физической величины;

q – единица физической величины;

N – числовое значение физической величины.

Данное представление идеализировано, поскольку в нем не учитываются погрешности измерений, которыми также занимается метрология и они являются предметом дальнейших исследований. В самом общем случае модель процесса измерения можно представить схемой, приведенной на рис. 3.1. Согласно этой схеме СИ приводят во взаимодействие с объектом, который является носителем n различных физических величин ($ФВ_1, \dots, ФВ_n$), характеризующихся своими истинными значениями (Q_1, \dots, Q_n).

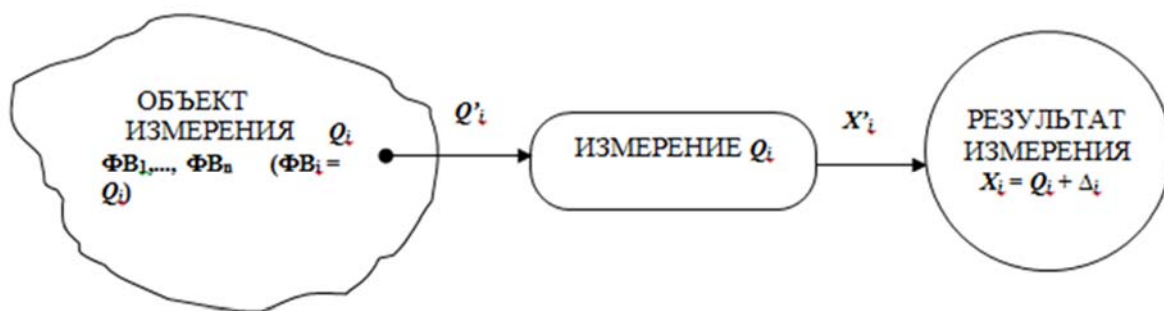


Рисунок 3.1 — Представление процесса измерения

Результат измерения X_i отличается от истинного значения измеряемой физической величины Q_i на значение погрешности измерения Δ_i . Поэтому измерения всегда характеризуется точностью измерения.

Точность измерений - близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины.

В основе любого измерения лежит сравнение исследуемой физической величины с аналогичной величиной определенного размера, принятой за единицу. Суть измерения состоит в определении числового значения физической величины. Этот процесс называют измерительным преобразованием, которое всегда осуществляется с использованием некоторого физического закона или эффекта, который рассматривают как принцип, положенный в основу измерения.

Принцип измерений – явление материального мира, положенное в основу измерения.

Например, измерение температуры с помощью термопары (использование термоэлектрического эффекта), измерение массы взвешиванием на пружинных весах (определение массы по пропорциональной ей силе тяжести, основанное на принципе пропорционального упругого растяжения).

Обмен результатами производственной и научной деятельности, международная кооперация в науке, промышленности и торговле требуют обеспечения достоверности результатов измерений. В метрологии есть понятие единство измерений, обеспечение которого является главной задачей метрологии. В РБ действует закон «Об обеспечении единства измерений» (последняя редакция-26.11.2019). Закон определяет правовые и организационные основы обеспечения единства измерений в РБ и направлен защиту государства и граждан от последствий неправильно выполненных измерений.

Единство измерений – состояние измерений, при котором результаты этих измерений выражены в допущенных к применению в Республике Беларусь единицах величин, обеспечена метрологическая прослеживаемость, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

Обеспечение единства измерений – деятельность, направленная на достижение и поддержание единства измерений в соответствии с требованиями законодательства об обеспечении единства измерений, международными

договорами Республики Беларусь, а также правом Евразийского экономического союза.

3.2 Классификация измерений

В технической литературе нет строгой классификации измерений. Это связано, прежде всего, с тем что измерения проводятся практически во всех областях деятельности человека и каждая область предполагает свои особенности и специфику. Однако общие классификационные признаки, относящиеся к различным областям деятельности, можно выявить. Они представлены на рис 3.2. Рассмотрим некоторые наиболее важные классификационные признаки подробнее.



Рисунок 3.2 — Классификация измерений

1) Классификация по методам измерений.

Метод измерений - прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей или соотнесения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений.

Конкретные методы измерений определяются видом измеряемых величин, их размерами, требуемой точностью результата, быстротой процесса измерения,

условиями, при которых проводятся измерения, и рядом других признаков. В принципе каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, которые могут отличаться друг от друга. Методы измерений принято делить на метод непосредственной оценки и метод сравнения (рис. 3.3)

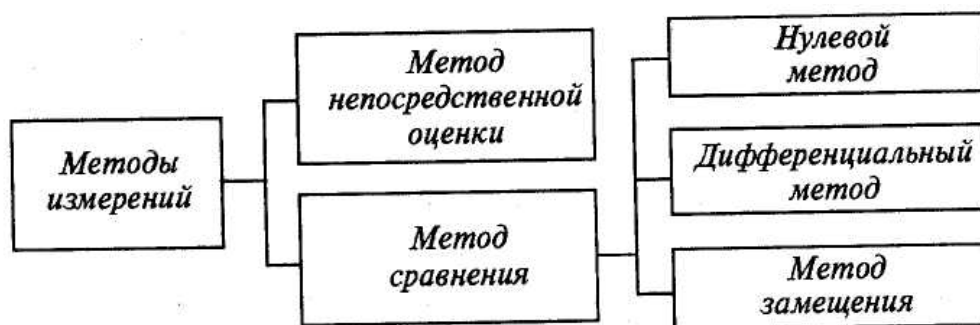


Рисунок 3.3 — Методы измерений

Метод непосредственной оценки - метод измерений, при котором численное значение измеряемой величины определяют непосредственно по показанию измерительного прибора.

При методе непосредственной оценки значение измеряемой физической величины определяют по отсчетному устройству прибора (например, измерение напряжения с помощью вольтметра, когда результат считывается непосредственно со шкалы или цифрового индикатора прибора). Суть данного метода, как любого метода измерения состоит в сравнении измеряемой величины с мерой, но в этом случае мера «заложена» в измерительный прибор опосредованно (например, шкалу). Быстрота процесса измерения методом непосредственной оценки, что является его главным достоинством, часто делает его незаменимым для практического использования, хотя точность измерения обычно ограничена (особенно у аналоговых средств измерения).

Метод сравнения – метод измерений, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Метод сравнения предполагает устройство сравнения и дополнительное средство измерения – меру (например, гири, угольники, эталонные резисторы и т.д.). Меры, как средства измерений, будут рассмотрены ниже. При методе сравнения результат измерения считывается с показаний меры. Погрешность метода сравнения меньше чем у метода непосредственной оценки и определяется точностью меры, однако они требуют большего времени измерения. Приборы, реализующие подобный метод, называются приборами сравнения. Метод сравнения имеет разновидности.

Нулевой метод, при котором действие измеряемой величины уравновешивается мерой. Пример – измерение массы взвешиванием на равноплечих рычажных весах с полным уравновешиванием чашек (рис. 3.4).

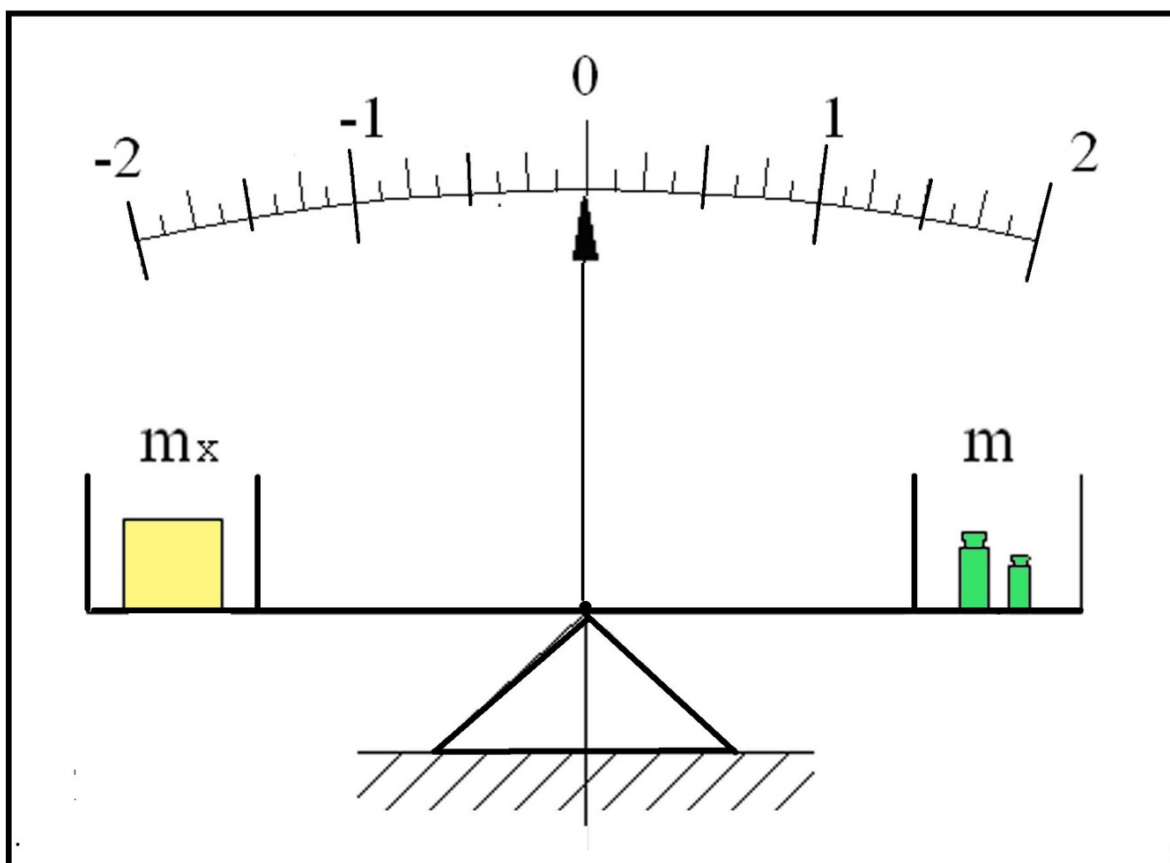


Рисунок 3.4 — Нулевой метод

Суть метода заключается в регулировании меры m (подбор гирь) таким образом, чтобы стрелочный указатель показывал «0». В этом случае можно полагать что неизвестная масса m_x равна массе мер m (гирь): $m_x = m$.

Дифференциальный метод, когда измеряется разница между измеряемой величиной и близкой ей по значению известной эталонной.

Измерение массы m_x таким методом показано на рис. 3.5. Результат измерения определяется как:

$$m_x = m_0 + \Delta_m,$$

где m_0 – масса мер;

Δ_m – результат измерения, считываемый по шкале.

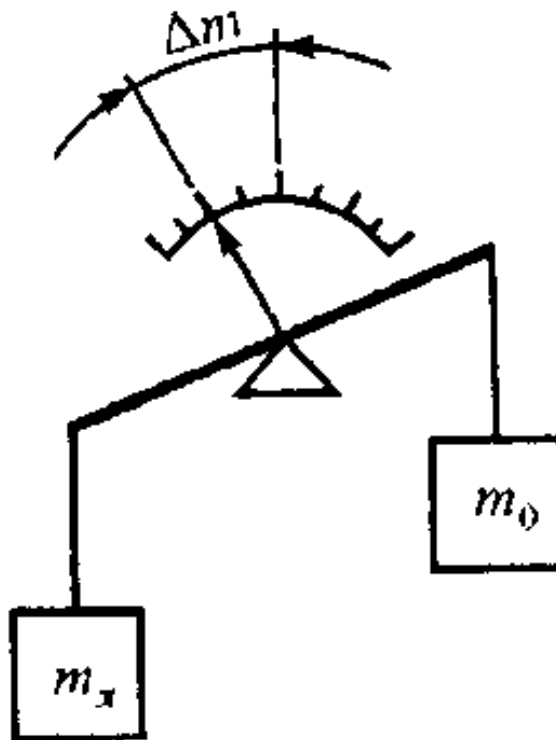


Рисунок 3.5 — Дифференциальный метод

Метод замещения, при котором действие измеряемой величины замещается мерой (рис.3.6).

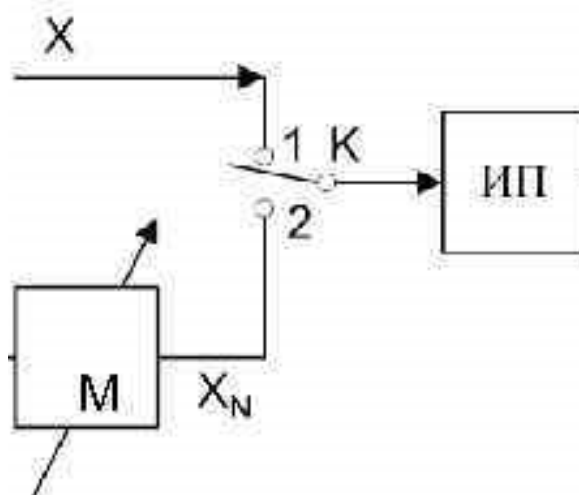


Рисунок 3.6 — Метод замещения

Суть метода заключается в следующем. Вначале на измерительный прибор подают измеряемую величину X (ключ K в положении -1). Фиксируют показания измерительного прибора ИП. Затем с меры M подают величину X_N и её

регулировкой добиваются тех же показаний ИП. В этом случае можно полагать что результат измерения равен показаниям меры $X = X_N$.

Следует отметить, что кроме этих разновидностей метода сравнения в различной литературе приведены некоторые другие.

2) Классификация по способам получения результатов измерений.

Измерения бывают прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямым называется измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений.

В ходе прямых измерений искомое значение величины определяют непосредственно по устройству отображения измерительной информации применяемого средства измерений. Например, измерение температуры с помощью термометра, измерение силы электрического тока с помощью амперметра и т.п.

Косвенное измерение, когда искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной.

При косвенных измерениях искомое значение величины Y рассчитывают на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

$$Y = F (X_1, X_2, \dots X_n),$$

где $X_1, X_2, \dots X_n$ - результаты прямых измерений;
 n – число прямых измерений.

Особенностью косвенных измерений является необходимость обработки результатов вне прибора (на бумаге, с помощью калькулятора или компьютера). При этом расчет косвенных измерений осуществляют вручную или автоматически получения результатов прямых измерений. Примерами косвенных измерений можно считать определение площади, объема, плотности материала и т.п. Прямые и косвенные измерения характеризуют измерения некоторой одиночной физической величины.

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

Например, измеряя сопротивления R_{ab} , R_{ac} и R_{bc} между вершинами треугольника (рис.3.7), в котором соединены сопротивления R_1 , R_2 и R_3 , и решая систему уравнений искомые значения сопротивлений по совокупным измерениям определяются как:

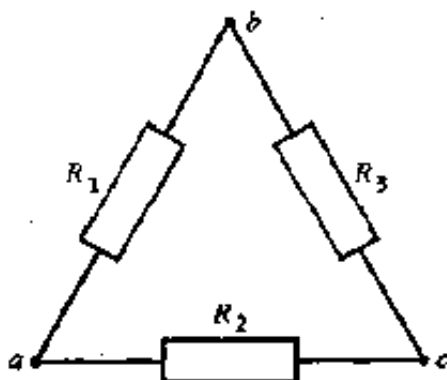


Рисунок 3.7 — Совокупные измерения

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

Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для определения зависимости между ними.

Примерами таких измерений могут быть комплексные измерения электрических, силовых и термодинамических параметров электродвигателя.

Как видно из приведенных определений, совокупные и совместные измерения весьма близки друг к другу.

3) Классификация по способу преобразования измеряемой величины.

По способу преобразования измеряемой величины и форме представления результата измерения делятся на аналоговые (непрерывные) и цифровые (дискретные).

При **аналоговых** измерениях измерительный прибор производит непрерывное преобразование измеряемой величины, результатом которого является перемещение указателя относительно шкалы. Заключение о численном значении величины делает оператор, отмечая положение указателя относительно отметок шкалы измерительного прибора. Точность такого измерения ограничивается геометрическими особенностями указателя и шкалы и часто не превышает 0,05 %.

При **цифровых измерениях** сравнение физической величины с рядом образцовых значений производится в измерительном приборе автоматически,

оператор же получает численное значение измеренной величины в цифровой форме.

4) Классификация по точности измерений

Рабочие (технические), измерения, которые выполняют с заранее установленной точностью. Погрешность измерения Δ не должна превышать заранее заданного (допустимого) значения $\Delta_{\text{доп}}$:

$$\Delta \leq \Delta_{\text{доп}},$$

Именно такие измерения наиболее часто осуществляются в производстве, откуда и взято их наименование. Как правило, погрешность рабочих измерений определяется погрешностью средства измерений.

Лабораторные, проводимые в лаборатории, например, при поверке средств измерений.

Прецизионные, выполняют с максимально достижимой точностью, добиваясь минимальной погрешности измерения $\Delta \rightarrow 0$.

Такие измерения имеют место, например, при эталонировании единиц, при выполнении уникальных исследований.

5) Классификация по характеру получения измерений.

Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

Результат измерения записывается в единицах измеряемой физической величины.

Относительное измерение – измерение отношения одноименных величин или функций этого отношения.

Пример, змерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве эталонной меры активности.

6) Классификация по числу измерений

Однократное измерение – измерение, выполненное один раз.

Многократное измерение – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений.

Многократные измерения проводят, например, для страховки от грубых погрешностей (в таком случае достаточно трех-пяти измерений). Также многократные измерения проводят с целью последующей математической обработки результатов (часто более пятнадцати измерений с последующими расчетами средних значений, статистической оценкой отклонений и др.).

Многokратные измерения называют также «измерения с многokратными наблюдениями».

7) Классификация по характеру изменения во времени

Статическое измерение – измерение величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Динамическое измерение – Измерение, при котором средства измерений используют в динамическом режиме.

Динамический режим использования средства измерений – режим, связанный с изменениями условий (факторов) за время проведения измерительного эксперимента, которые влияют на результат измерения (оценку измеряемой величины), в т.ч. изменение измеряемой величины за время измерения.

Статические и динамические измерения наиболее логично рассматривать в зависимости от скорости получения средством измерения входного сигнала измерительной информации. При измерении в **статическом режиме** скорость изменения входного сигнала несоизмеримо ниже скорости его преобразования в измерительной цепи, и результаты фиксируются без динамических искажений.

При измерении в **динамическом режиме** появляются дополнительные динамические погрешности, связанные со слишком быстрым изменением входного сигнала измерительной информации, поступающего от измеряемой величины.

8) Классификация по условиям проведения измерений

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

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

9) Классификация по связи с объектом.

Контактный метод измерений – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения.

Примеры: измерение диаметра вала индикаторной скобой, измерение температуры тела термометром.

Бесконтактный метод измерений – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения.

Примерами могут быть измерение температуры в доменной печи пирометром и измерение расстояний лазерной рулеткой.

При контакте необходимо учитывать взаимодействия объекта и средства измерений (контактные деформации, колебание переходных сопротивлений и др.). При отсутствии механического контакта следует учитывать особенности «бесконтактного съема» измерительной информации – оптические искажения в воздухе, ослабление сигнала на расстоянии и т.д.

Помимо перечисленных классификационных признаков выделяют ряд областей измерений, например, механические, магнитные, акустические, измерения ионизирующих излучений и др. В областях есть виды измерений, например, в области электрических и магнитных измерений различают измерения электрического сопротивления, электродвижущей силы, электрического напряжения, магнитной индукции и т.п.

4 Средства измерительной техники

4.1 Средства измерительной техники

Измерение связано с нахождением значения физических величин опытным путём с помощью технических средств, называемых средствами измерений (СИ). Однако в процессе проведения измерения помимо средств измерений часто используются дополнительные вспомогательные устройства и принадлежности: вспомогательные устройства, измерительные механизмы, регистраторы, индикаторы и т.п. Все эти устройства относятся к средствам измерительной техники.

Средства измерительной техники – обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений.

К средствам измерительной техники относятся: средства измерений эталоны, измерительные системы, измерительные установки, измерительные принадлежности, средства сравнения, стандартные образцы и др.

Средство измерений - техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики. Более подробней разновидности средств измерений будет рассмотрено ниже.

Измерительные принадлежности – вспомогательные средства, служащие для обеспечения необходимых условий для выполнения измерений с требуемой точностью. Основное назначение измерительных принадлежностей – защита от воздействия влияющих величин. Вот некоторые примеры устройств, относящихся к измерительным принадлежностям.

Тренога для установки прибора по уровню, исключая влияние неправильного положения средства измерений.

Термостат, служащий для поддержания определенной температуры в процессе измерений. Исключает влияние внешней температуры.

Барокамера, имеющая возможность герметизации и создания внутри камеры давления большего (гипербарические барокамеры) или меньшего (гипобарические барокамеры), чем атмосферное. Исключает влияние изменения атмосферного давления.

Специальные противовибрационные фундаменты, защищают от воздействия вибрации грунта.

Устройства, экранирующие влияние электромагнитных полей.

Измерительное устройство - часть измерительного прибора, связанная с измерительным сигналом и имеющая обособленную конструкцию и назначение. Примерами могут служить следующие устройства.

Детектор - техническое средство или вещество, которое указывает на наличие определенного свойства объекта измерения при превышении порогового значения соответствующей величиной (галогенный течеискатель, лакмусовая бумага. В химии для этого понятия часто используют термин индикатор).

Средство сравнения - техническое средство или определенная среда, посредством которых возможно выполнять сравнение друг с другом мер

однородных величин или показания измерительных приборов (рычажные весы, на одну чашку которых устанавливается гиря, а на другую измеряемая масса). Иногда техническое средство снабжается средством измерений, обеспечивающим функцию сравнения.

Стандартный образец - образец вещества или материала с установленными значениями одной или более величин, характеризующих свойство или состав этого вещества или материала (стандартный образец углеродистой стали, стандартный образец составов растворов, стандартный образец шероховатости поверхности).

Эталон - средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений. Это высокоточная мера или точный измерительный прибор. Основным назначением эталонов является хранение и воспроизведения единицы физической величины для передачи ее размера другим эталонам и рабочим средствам измерений. Конструкция эталона определяется природой физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать такими признаками как неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

4. 2 Классификация средств измерений

Рассмотрим основные классификационные признаки средств измерений.

По назначению.

По своему функциональному назначению средства измерений разделяются на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы и измерительно-вычислительные комплексы.

Мера - средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями.

Мера является простейшим средством измерений. Она хранит и воспроизводит физическую величину одного или нескольких заданных размеров. Главная отличительная особенность меры – отсутствие каких-либо преобразований измерительной информации самим средством измерений. Примеры мер: гиря, мера вместимости – мерный стакан, эталонный резистор, измерительная линейка, концевая мера длины, эталонный генератор сигналов. Конструктивно меры имеют разновидности.

Однозначная мера, которая воспроизводит физическую величину одного заданного размера (гиря 1 кг).

Многозначная мера, воспроизводящая физические величины ряда размеров (измерительная линейка, измерительный генератор).

Набор мер, представляющий комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, наборы концевых мер длины).

Магазин мер – это набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

Мера может быть эталоном.

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

Измерительные преобразователи только преобразуют измерительную информацию и могут выдавать ее в форме, не поддающейся непосредственному восприятию оператором. В свою очередь измерительные преобразователи также классифицируют по различным признакам.

По характеру преобразования измерительной информации различают. Аналоговый измерительный преобразователь, преобразующий одну аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал) в другую аналоговую величину. Аналого-цифровой измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код. Цифро-аналоговый измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования числового кода в аналоговую величину.

По месту включения преобразователя в измерительную цепь различают первичный измерительный преобразователь – на который непосредственно воздействует материальный объект или явление, являющееся носителем величины, подлежащей измерению (терморезистор, фотоэлемент). В одном средстве измерений может быть несколько первичных преобразователей, например, ряд первичных преобразователей измерительной системы, расположенных в разных точках контролируемого объекта. Промежуточный измерительный преобразователь, занимающий место в измерительной цепи после первичного преобразователя.

Особо необходимо отметить понятие датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию). Как правило, датчик выполняется в отдельном жёстком корпусе, и он преобразует измеряемую величину в электрический сигнал (напряжение, ток и др.).

Чувствительный элемент — часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал. Часто различия между понятиями датчик и чувствительный элемент «смазываются». Так, основное различие между преобразователем и датчиком состоит в том, что преобразователь представляет собой устройство, которое может преобразовывать энергию из одной формы в другую, тогда как датчик представляет собой устройство, которое может обнаруживать физическую величину и преобразовывать данные в электрический сигнал.

Кроме рассмотренных измерительные преобразователи классифицируют и по другим признакам.

Измерительный прибор - средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия. Например, вольтметр, микрометр, термометр, осциллограф.

В измерительном приборе информация от измеряемой ФВ преобразуется и выдается в форме, удобной для восприятия оператором (в виде отклонения стрелки относительно шкалы, в виде цифровой индикации). Кроме того, эта информация может быть автоматически передана в ЭВМ. Прибор включает в себя один или несколько измерительных преобразователей и устройство отображения измерительной информации (шкала-указатель, указатель-диаграммная бумага, числовое табло). Измерительные приборы также классифицируются по различным признакам.

По способу представления измерительной информации бывают показывающие измерительные приборы, в котором сигнал измерительной информации представлен в визуальной форме. Регистрирующие измерительные приборы, которые регистрируют значение измеряемой величины (записывающие либо печатающие). По способу обработки измерительной информации бывают аналоговые и цифровые измерительные приборы.

По принципу действия различают приборы прямого действия, в которых производится одно или несколько преобразований измеряемой величины в одном направлении, т.е. без обратной связи (рис. 4.1).

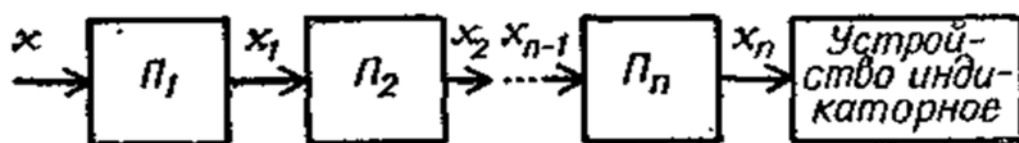


Рисунок 4.1 — Приборы прямого действия

Такой прибор состоит из последовательно соединенных преобразователей P_1, P_2, \dots, P_n и индикаторного устройства (ИУ). Измеряемая величина X последовательно преобразуется в выходной сигнал X_n , который отображается на ИУ.

Прибором сравнения (компенсационного преобразования) называется измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с мерой (рис.4.2).

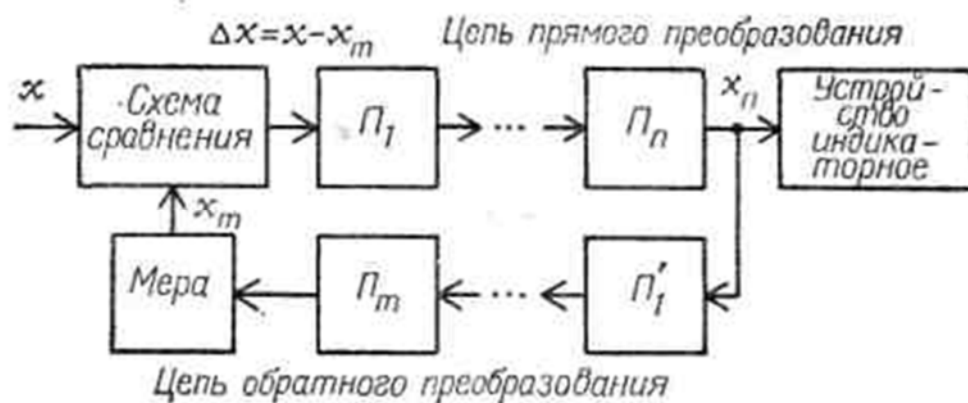


Рисунок 4.2 — Прибор сравнения

Измеряемая величина подвергается прямому преобразованию в преобразователях $\Pi_1 \dots \Pi_n$ и по цепи обратной связи сигнал X_n через преобразователи $\Pi'_1 \dots \Pi'_m$ управляет значением меры. При полной компенсации в установившемся режиме

$$\Delta X = X - X_m = 0,$$

индикаторное устройство будет показывать «0». Результат измерения снимается с показаний меры $X = X_m$. Простейший пример прибора сравнения - рычажные весы.

Измерительный прибор может быть эталоном.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных и расположенных в одном месте мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких величин.



Рисунок 4.3 — Установка для поверки манометров.

Примером измерительной установки является установка для поверки манометров (рис.4.3).

Измерительная система – совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту.

Примером может служить измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о ряде величин в разных энергоблоках. Она может содержать сотни измерительных каналов.

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

Перечисленные средства измерений могут включать в свой состав типовые элементы, к которым можно отнести измерительные механизмы, показывающие устройства, регистрирующие устройства, цифровые табло измерительного прибора и пр.

По **важности измеряемой физической величине** средства измерений разделяют на основные и вспомогательные.

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

Вспомогательное средство измерений – средство измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учитывать для получения результатов требуемой точности. Например, термометр для измерения температуры газа в процессе измерений объемного расхода этого газа.

По **степени универсальности** средства измерений разделяют на специализированные и универсальные.

По **характеру использования** средства измерений разделяют на лабораторные и технические.

В зависимости от **степени участия оператора** в процессе, различают автоматические, автоматизированные и неавтоматизированные средства измерений. **Автоматическое** средство измерений – производящее измерения без непосредственного участия человека. Все операции, связанные с обработкой результатов измерений, их регистрацией, передачей данных или выработкой управляющего сигнала осуществляются автоматически. **Автоматизированное** средство измерений – производящее в автоматическом режиме одну или часть измерительных операций.

По **метрологическому назначению** различают эталонные и рабочие средства измерений. **Рабочее** средство измерений – предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений. **Эталонные** средства измерений называют также средствами поверки. Средства поверки – эталоны, поверочные установки и другие средства измерений, применяемые при поверке в соответствии с установленными правилами.

Кроме перечисленных признаков средства измерений подразделяются на виды, типы и принципы действия. Вид средства измерений – совокупность средств измерений, предназначенных для измерений данной физической величины. Тип средства измерений – совокупность 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 технической документации. Средства измерений одного типа могут иметь различные модификации, например, индикаторы часового типа (ИЧ) отличаются по диапазонам показаний.

Средства измерений узаконивают уполномоченные органы. Узаконенное средство измерений – средство измерений, признанное годным и допущенное для применения уполномоченным на то органом. Средства измерений подвергают испытаниям и в случае положительных результатов вносят в Госреестр. Одним из методов официального утверждения является стандартизация средств измерений. Стандартизованное средство измерений – изготовленное и применяемое в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта. Не все средства измерений стандартизуют. Разработанные для единичного производства средства измерений могут быть узаконены без их стандартизации. Нестандартизованное средство измерений (НСИ) – стандартизация требований к которому признана нецелесообразной.

4.3 Типовые конструктивные элементы

Измерительная цепь – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода. Измерительную цепь измерительной системы называют **измерительным каналом**.

Показывающее устройство средства измерений – совокупность элементов средства измерений, которые обеспечивают визуальное восприятие значений измеряемой величины или связанных с ней величин. Показывающие устройства приборов чаще всего выполнены в виде системы шкала-указатель. Показывающее устройство «цифрового» измерительного прибора называется табло цифрового измерительного прибора.

Шкала средства измерений – часть показывающего устройства средства измерений, представляющая собой упорядоченный ряд отметок вместе со связанной с ними нумерацией. Отметки на шкалах могут быть нанесены равномерно (равномерная шкала) или неравномерно (неравномерная шкала).

Отметка шкалы – знак на шкале средства измерений (черточка, зубец, точка и др.), соответствующий некоторому значению физической величины. Отметку шкалы средства измерений, у которой проставлено число, называют числовая отметка шкалы, а промежуток между двумя соседними отметками шкалы средства измерений называется делением шкалы. Различают начальное значение шкалы (наименьшее значение величины, которое может быть отсчитано по шкале средства измерений) и конечное значение шкалы (наибольшее значение, которое может

быть отсчитано по шкале). Так для медицинского термометра начальным значением шкалы является отметка +34,3 °С, а конечным значением шкалы является отметка +42 °С.

Длина шкалы - длина линии, проходящей через центры всех самых коротких отметок шкалы средства измерений и ограниченной начальной и конечной метками.

Цена деления шкалы - разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Указатель средства измерений – часть показывающего устройства, положение которой относительно отметок шкалы определяет показания средства измерений. Указателем может быть стрелка, штрих, кромка детали, перемещающейся относительно шкалы, световое пятно с маркой, край столбика жидкости и т.д. Изменение показаний в системе шкала-указатель, может осуществляться за счет перемещения любого из элементов относительно другого.

Кроме демонстрирующих в метрологии используют также и регистрирующие приборы.

Регистрирующее устройство средства измерений – совокупность элементов средства измерений, которые регистрируют значение измеряемой или связанной с ней величины. В качестве регистрирующего устройства могут использоваться самописцы, печатающие устройства (символьные, цифропечатающие, формирующие изображение из точек), устройства с фоторегистрацией или магнитной регистрацией данных и другие.

5 Погрешности измерений. Систематические погрешности

5.1 Погрешности измерений и их классификация.

Погрешность измерения - разность между измеренным значением величины и опорным значением величины. Если в качестве опорного значения выступает истинное, то погрешность измерения - разность между измеренным значением величины и истинным значением величины. В силу целого ряда причин, измерить истинное значение Q физической величины принципиально невозможно. Поэтому значение физической величины X , полученное в результате измерения, всегда отличается от истинного значения на некоторую величину Δ , которую называют погрешностью измерения.

$$X = Q + \Delta.$$

Иными словами, погрешность измерения Δ , это отклонение результата измерения X от истинного значения измеряемой величины Q , т.е.

$$\Delta = X - Q.$$

Вопросами погрешности измерений занимается теория погрешностей. Погрешность является неотъемлемым свойством любых измерений, которую принципиально исключить нельзя, однако ее можно и нужно оценить. Поэтому в задачу любого измерения входит необходимость нахождения и оценка погрешности.

Причины возникновения погрешностей отличаются большим разнообразием. К ним относятся:

- Несовершенство методов и технических средств измерений;
- Воздействие внешней среды;
- Недостаток опыта оператора;
- Физиологические особенности оператора и многие другие.

Рассмотрим основные классификационные признаки погрешности измерений. В зависимости от **характера проявления** погрешности делятся на случайные, систематические и грубые.

Случайная погрешность измерения ($\dot{\Delta}$) – это составляющая погрешности измерения, которая изменяется случайным образом, при многократном измерении одной и той же величины (рис.5.1 а).

Систематическая погрешность измерения (Δ_c) - это составляющая погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется при многократных измерениях одной и той же величины (рис.5.1 б).

Как правило, эти погрешности действуют совместно (рис. 5.1 в).

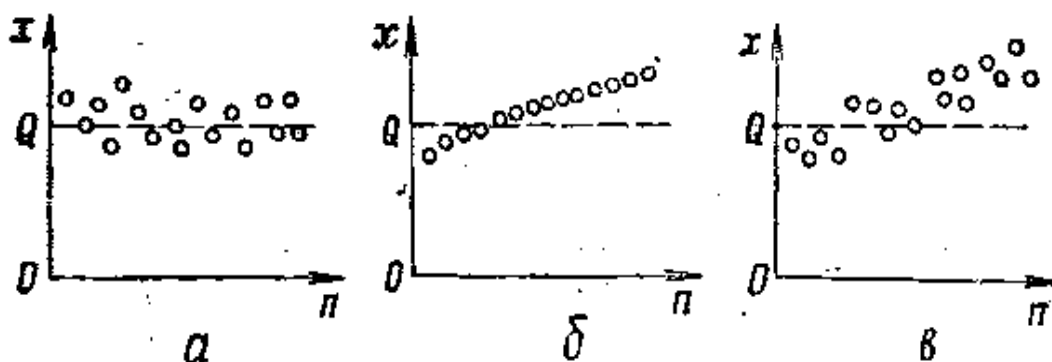


Рисунок 5.1

Грубая погрешность (промах) – это погрешность измерения существенно превышающая ожидаемую при данных условиях измерения. Она может носить как случайный, так и систематический характер. Грубая погрешность может возникнуть в результате неправильных действий оператора, ошибок при отсчете показаний и т.п. Они должны быть своевременно обнаружены и исключены из результатов измерений.

В зависимости от **изменения во времени измеряемой величины** погрешности делятся на статические и динамические.

Статическая погрешность – это погрешность при измерении постоянной во времени измеряемой величины.

Динамическая погрешность – это разность между погрешностью в динамическом режиме и статической погрешностью. Она возникает в следствие инерционности средств измерения.

В зависимости от **характера влияния на результат измерения** погрешности делятся на аддитивные (Δ_{add}) и мультипликативные (Δ_{mult}).

Аддитивная погрешность - такая погрешность, которая не зависит от значения измеряемой величины.

Мультипликативная погрешность – это такая погрешность, значение которой изменяется с изменением измеряемой величины.

На практике погрешности часто имеют как аддитивную, так и мультипликативную составляющую и могут иметь как случайный, так и систематический характер (рис. 5.2).

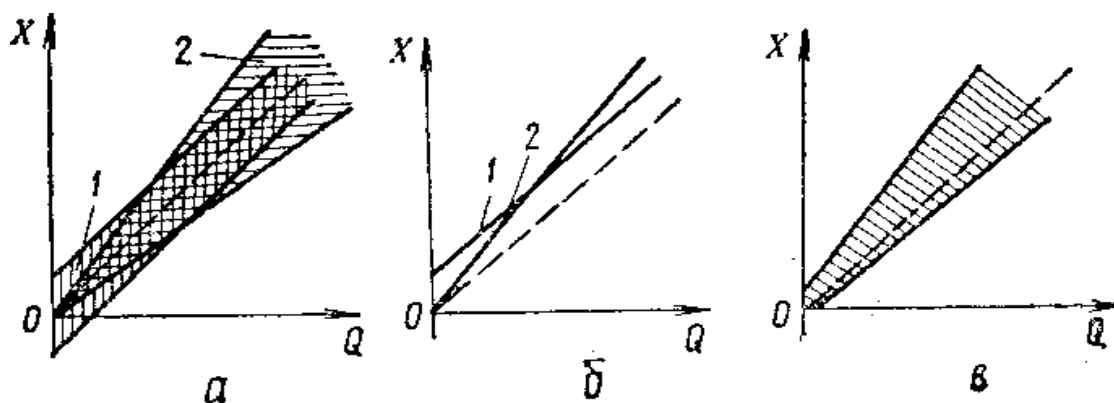


Рисунок 5.2 — а-случайные аддитивные (1) и мультипликативные (2); б- систематические аддитивные (1) и мультипликативные (2); в-случайные и систематические с аддитивными и мультипликативными составляющими

5.2 Систематические погрешности измерений

Систематические погрешности принято классифицировать по двум главным признакам - по характеру проявления и по причинам их возникновения (рис.5.3). Рассмотрим подробнее эти признаки.

По характеру проявления.

Постоянные систематические погрешности это такие, которые не изменяются во времени.

Переменные систематические погрешности это такие, которые изменяются с течением времени. В свою очередь, переменные систематические погрешности подразделяются на прогрессивные и периодические. **Прогрессивные** монотонно изменяются в течении времени. Например, погрешности, вызванные разрядом питающих электронный измерительный прибор батарей, старением и износом измерительных механизмов и т.д. **Периодические** погрешности



Рисунок 5.3 — Классификация систематических погрешностей

изменяются во времени по периодическому закону, например, по синусоидальному (эксцентриситет).

Иногда переменные погрешности изменяются не по периодическому, а по более сложным законам, например, погрешность счетчика электроэнергии от мощности нагрузки.

По причинам возникновения систематические погрешности подразделяются на инструментальные (погрешности средства измерения), внешние, личные (субъективные) и методические (погрешности метода измерений).

Инструментальные обусловлены свойствами самих средств измерений. Их принято разделять на три группы: погрешности схемы, технологические погрешности и эксплуатационные погрешности.

Погрешности схемы присущи самой структурной (кинематической) схеме средства измерения и не связана с недостатками его изготовления.

Технологические погрешности являются следствием несовершенства или нарушения технологии изготовления средств измерения (смещение штрихов на шкалах, отклонения элементов схем от номинальных значений и т.д.).

Эксплуатационные погрешности связаны со старением и износом средств измерения (уменьшается массы гирь за счет их стирания, стираются грани концевых мер длины и измерительных инструментов, изменяют собственную частоту кварцевые резонаторы и т.д.).

Иногда к эксплуатационным погрешностям относят и погрешности **взаимодействия**. Под ними понимают разность между истинным значением измеряемой величины, которая имела место до подключения средств измерения и после подключения. Например, подключение вольтметра с малым входным сопротивлением приводит к уменьшению истинного значения напряжения на участке цепи, а подключение резонансного частотомера – к изменению частоты генератора.

Внешние погрешности обусловлены влиянием внешних условий на результаты измерений. К этим условиям относятся: изменение температуры окружающей среды, изменение атмосферного давления, изменение влажности воздуха, изменение питающих напряжений, влияние внешних электрических и магнитных полей, неправильное расположение средств измерения относительно горизонтали и др.

Личные погрешности обусловлены индивидуальным свойством человека, проводящего измерения (остротой его зрения, слуха, временем реакции на раздражитель), а также укоренившимися навыками (например, снятие результата измерения со шкалы со стрелочным указателем под углом, приводящем к параллаксу).

Погрешности метода измерений являются следствием несовершенства используемого метода измерений, допущений или упрощений. Погрешность метода измерения не связана с погрешностью средства измерения.

Раздел III. ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

6 Уменьшение и исключение систематических погрешностей

6.1 Методы выявления систематических погрешностей

Результат измерений, содержащий систематическую погрешность, называется неисправленным результатом измерений, а исправленный – это такой результат, из которого исключена систематическая погрешность. Для исключения систематической погрешности ее, во-первых, необходимо обнаружить и, во-вторых, определить ее значение и знак. В метрологии есть правила: систематическая погрешность может и должна быть обнаружена, а если она обнаружена, то она должна быть исключена из результатов измерения.

Обнаружение или выявление систематических погрешностей достаточно сложная задача и обычно приобретает с опытом работы. Тем не менее, существуют общие приемы по обнаружению систематических погрешностей. На рисунке схематично показаны некоторые методы выявления систематических погрешностей.



Рисунок 6.1 — Методы выявления систематических погрешностей

1) Хороший результат дают многократные измерения с их последующим графическим представлением и анализом – графический метод (метод точечных диаграмм). Однако такой прием позволяет обнаружить лишь переменную систематическую погрешность.

2) Для обнаружения постоянной систематической погрешности необходимо повторить измерения, используя другое однотипное или иного типа средство

измерения. Причем при замене типа средства измерения можно также выявить не только постоянную инструментальную погрешность, но и погрешность метода.

3) Для обнаружения внешних систематических погрешностей целесообразно изменить условия измерений (взаимного расположения средств измерений, соединительных проводников, отключение неиспользуемых средств измерений и т.д.).

4) Для обнаружения субъективных погрешностей, целесообразно поручить выполнение измерения другому оператору.

Перечисленные способы позволяют установить сам факт существования систематических погрешностей. Определение конкретного значения погрешностей, ее снижение либо исключения является самостоятельной задачей. Эта операция должна проводиться на всех этапах измерения: на этапе подготовки к измерению (до начала измерений), в процессе измерений и на этапе обработки результатов измерений. Рассмотрим эти этапы подробнее.

6.2 Устранение систематических погрешностей

1) На этапе подготовки измерений. В метрологии этот этап называют профилактикой погрешностей. Профилактика погрешностей предполагает:

- выявление теоретических погрешностей метода или средств измерений и их исключение или учет до начала измерений;
- необходимость использования только исправных и поверенных средств измерений;
- строгое соблюдение правил использования средств измерений и методик выполнения измерений;
- необходимость тщательной подготовки средств измерения (калибровка, установка "0" и т.д.) в соответствии с правилами эксплуатации;
- стабилизацию условий измерений и защиту средств и объектов измерений от нежелательных воздействий влияющих величин (правильного расположения средства измерения, прогрев электронных средств измерений в соответствии с инструкцией по эксплуатации, использования только табельных принадлежностей к средствам измерения и т.д.);
- обучение операторов и контроль их квалификации.

2) В процессе измерений. Используют различные методы и приемы. Например, метод замещения, суть которого подробно рассмотрен в лекции №3. Этот метод позволяет исключить постоянную систематическую погрешность.

Использование **компенсационного** метода позволяет исключить инструментальную (например, люфта измерительного механизма) и внешнюю погрешности (например, влияния магнитных полей). Метод применяется в том случае, если источник систематической погрешности имеет направленное действие. Суть метода заключается в том, что измерение проводят дважды, но так, чтобы неизвестная систематическая погрешность Δ_c входила в результаты измерений X_1 и X_2 с противоположными знаками (формула?). Тогда искомое действительное значение X_d измеряемой величины может быть найдено как

среднее арифметическое двух результатов измерений. Действительно, для первого результата измерения $X_1 + \Delta_c$, а для второго, $X_2 - \Delta_c$. Тогда

$$X = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{X_0 + \Delta_c + X_0 - \Delta_c}{2} = X_0.$$

Метод противопоставлений. Измерение выполняется дважды таким образом, чтобы результаты измерений различались между собой. Пример применения метода показан на рисунке 6.2, когда необходимо устранить систематическую погрешность, вызванную неравномерностью длин плеч l_1 и l_2 весов.



Рисунок 6.2 — Измерение массы методом противопоставления

Условие равновесия весов определяется выражением:

$$m_x l_1 = m_0 l_2,$$

где m_x и m_0 , соответственно, измеряемая масса и масса меры (гири). Если $l_1 = l_2$, то $m_x = m_0$. Если длины плеч не одинаковы, т.е. $l_1 \neq l_2$, то возникает систематическая погрешность Δ_c

$$\Delta_c = m_0 \left(\frac{l_1}{l_2} - 1 \right).$$

Измерения проводят дважды, меняя местами неизвестную массу m_x с мерой m_0 . Тогда при первом измерении $m_x l_1 = m_{01} l_2$, а при втором $m_{02} l_1 = m_x l_2$, где m_{01} и m_{02} , соответственно, значения мер при первом и втором измерении. Действительное значение измеряемой величины рассчитывают по формуле:

$$m_x = \sqrt{m_{01} m_{02}}.$$

Как видно, длины плеч не входят в выражение, а, значит, систематическая погрешность за счет неравномерности длин плеч компенсирована.

Использование метода **рандомизации** основано на переводе систематической погрешности в разряд случайных с последующей статической обработкой результатов измерения. Одним из вариантов метода является многократное измерение одной и той же величины различными, но однотипными средствами измерений. Для каждого экземпляра средства измерений погрешность будет систематической, но для ансамбля средств измерений она будет случайной, распределенной по нормальному закону.

Устранение систематических погрешностей может также осуществляться применением различного рода **корректирующих устройств**.

3) На этапе обработки результатов измерений. Если значения систематической погрешности известно, то погрешность может быть исключена из результатов измерения введением **поправок** или **поправочных множителей**.

Поправкой η называется величина, равная по абсолютному значению систематической погрешности Δ_c , но противоположная ей по знаку: $\eta = -\Delta_c$. Поправки используют, как правило, для исключения аддитивной систематической погрешности:

$$X_d = X + \eta,$$

где X_d – действительное значение,
 X – результат измерения.

Для исключения мультипликативной погрешности используют поправочный множитель q

$$X_d = qX.$$

Поправка и поправочный множитель определяется экспериментально, например, при поверке и калибровке средств измерений, а также из таблиц, формул, графиков, приводимых в документации к средствам измерения.

Графический метод или метод **точечных диаграмм** заключается в анализе точечных диаграмм. Метод сравнительно простой и достаточно эффективный. Он позволяет не только выявлять и оценивать переменные систематические и случайные составляющие погрешности измерений, но и отбраковывать результаты с явно выраженными грубыми погрешностями.

Точечную диаграмму строят в координатах «номер измерения n – результат измерения X ». Следует помнить, что точечная диаграмма не является графиком результатов измерений, поскольку по оси абсцисс не откладывают аргумент какой-либо функции. Любая проявляющаяся на точечной диаграмме тенденция изменения результатов свидетельствует только об изменении во времени аргументов, вызывающих переменные систематические погрешности измерений. Проведение аппроксимирующей линии и оценка тенденции осуществляются на основе предположения о равномерном изменении аргумента от измерения к измерению, причем сам аргумент по точечной диаграмме выявить невозможно.

При построении точечной диаграммы обычно из технических соображений по оси ординат предпочитают откладывать не сами результаты измерений, а их отклонения от некоторого условного значения. Масштаб желательно выбрать таким, чтобы размах результатов измерений на диаграмме можно было оценить двумя значащими цифрами. Идеальная точечная диаграмма серии измерений должна представлять собой ряд точек, располагающихся на одинаковой высоте, которая соответствует истинному значению измеряемой физической величины Q (рис.6.3)

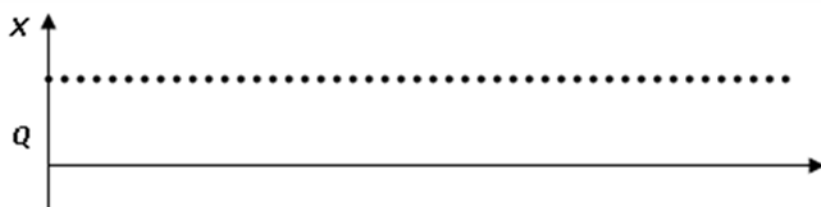


Рисунок 6.3 — Точечная диаграмма

Тенденция изменения результатов измерений в серии может быть вызвана только наличием систематической переменной погрешности определенного вида. Возможные тенденции изменения результатов в сериях измерений, проявляющиеся на точечных диаграммах, представлены на рисунке 6.4.

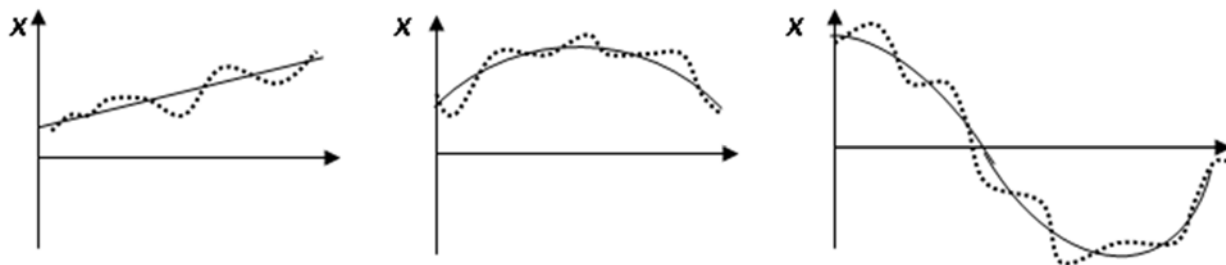


Рисунок 6.4 — Тенденции изменения результатов измерений *a* – наклон, *b* – мода, *c* – гармонические изменения аппроксимирующей линии).

Отклонения результатов от аппроксимирующей линии могут рассматриваться как случайные составляющие погрешности измерения. В качестве первичной оценки погрешности измерений в серии, включающей систематическую и случайную составляющие, может быть использован размах результатов многократных измерений (рис.6.5)

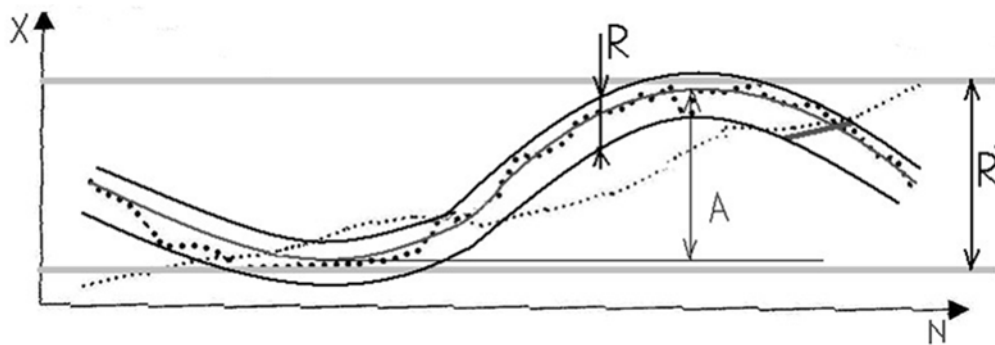


Рисунок 6.5

$$R' = X_{max} - X_{min}.$$

Чтобы получить геометрическое представление размаха R' результатов измерений в серии, следует провести две прямые, параллельные оси абсцисс, через самую верхнюю и самую нижнюю точки точечной диаграммы. Размах R' включает в себя как рассеяние результатов из-за случайной составляющей погрешности измерений, так и переменную систематическую составляющую погрешности (при ее наличии), вызывающую закономерное изменение результатов во времени. С использованием точечной диаграммы можно осуществить «частичное исправление» результатов измерений. Аппроксимирующая линия отражает изменения результатов из-за систематических погрешностей. В этом случае делается допущение, что аппроксимирующая линия полностью отражает систематические изменения результатов (представляет собой линию «текущего среднего значения»), а отклонения от этой линии рассматривают как случайные составляющие погрешности каждого из наблюдений. Числовые оценки отклонений определяют по точечной диаграмме с учетом ее масштаба. Предложенный прием позволяет разделить и наглядно представить на диаграмме систематические и случайные составляющие погрешности измерений. Описанное «исправление» результатов измерений названо частичным, поскольку неизвестное (и потому отсутствующее на диаграмме) истинное значение измеряемой величины искусственно заменяется некоторым «текущим средним значением». «Текущее среднее значение» воспроизводится на диаграмме аппроксимирующей линией, учитывающей влияние переменной части систематической погрешности.

6.3 Специальные методы оценивания систематических погрешностей

Рассмотрим некоторые специальные методы, позволяющие в некоторых случаях оценить систематические погрешности измерений.

Метод проверки средства измерений в рабочих условиях основан на контроле показаний прибора по результатам измерений им «точной меры» в перерывах между рабочими измерениями. Наиболее эффективным такой метод будет при автоматическом переключении на измерение меры и автоматическом внесении поправки в результаты последующих измерений или автоматической

поднастройке средства измерений. Поскольку предусмотрено определение значения погрешности «в рабочих условиях» и в ограниченном числе точек, такой метод не может соответствовать проверке средства измерения. Его следует рассматривать как автоматизированную поднастройку средства измерения или автоматизированный метод получения поправки и внесения ее в результаты измерений. С точки зрения общих методов выявления погрешностей он базируется на измерении «точно известной» величины, воспроизводимой мерой.

Метод образцовых сигналов заключается в проверке искажения известной измерительной информации в процессе ее преобразования. В начало измерительной цепи подается нормированный (эталонный) сигнал и отслеживается его отклик в конце измерительной цепи. Разность между номинальным и реальным значениями откликов принимают за оценку погрешности. Эталонный сигнал может подаваться на первичный измерительный преобразователь, например, с помощью точной меры. В таком случае этот метод ничем не отличается от метода измерения «точной меры». Если эталонный сигнал подается на промежуточный измерительный преобразователь, проверяется только часть преобразующей цепи применяемого средства измерений. Использование такого метода рекомендуется при наличии в средстве измерений промежуточного измерительного преобразователя, дающего доминирующую часть погрешности. Метод может дать хороший эффект при автоматизации процесса подачи эталонного сигнала и обработки результатов.

Тестовый метод можно рассматривать как расширенный вариант предыдущего, отличающийся использованием переменных образцовых сигналов. Метод реализуется путем измерений испытуемым средством измерения ряда физических величин с разными значениями, воспроизводимых «точными мерами».

Метод инвертирования сигнала – специфическая реализация метода образцовых сигналов, в котором нормированный сигнал подается в направлении от конца к началу измерительной цепи. За оценку погрешности принимают разность между номинальным и реальным значениями откликов в начале измерительной цепи. Очевидно, что не все приборы способны успешно пропускать сигнал измерительной информации в направлении, обратном «нормальному». Кроме того, в прямом направлении сигнал измерительной информации усиливается, что облегчает процедуру оценивания разности между номинальным и реальным значениями откликов. При пропускании сигнала измерительной информации в обратном направлении масштаб сигнала уменьшается, что существенно усложняет оценивание разности между номинальным и реальным значениями откликов.

Метод симметричных наблюдений состоит в анализе трех сопряженных результатов из серии многократных измерений. Например, при одинаковых изменениях аргумента, вызывающего прогрессирующую (увеличивающуюся) погрешность, результат измерения под номером $N = i - 1$ будет на столько же меньше результата с номером i , на сколько этот результат будет меньше «симметрично расположенного» следующего результата с номером $i + 1$. Очевидно, такой метод может быть эффективным только в том случае, когда соблюдаются приведенные допущения, а случайные составляющие погрешности

результатов будут значительно меньше систематического изменения. Фактически «метод симметричных наблюдений» представляет собой анализ усеченной до трех результатов точечной диаграммы с присущими такому сокращению недостатками.

Метод вспомогательных измерений (измерений влияющих величин, выходящих за нормальные области значений) используется для определения значений поправок, компенсирующих погрешности из-за воздействия влияющих физических величин. Для определения значений поправок необходимо знать не только значения аргументов, которые получают с помощью «вспомогательных измерений», но и функции влияния на результаты измерений влияющих физических величин.

Рассмотренные методы выявления и оценки погрешностей в ряде случаев могут распространяться не только на систематические, но и на случайные погрешности, о чем обычно не говорят, поскольку случайные погрешности индивидуально непредсказуемы. Следует иметь в виду, что если речь идет не о прогнозировании погрешностей, а о полученных конкретных результатах измерений, то в них погрешности и их составляющие имеют фиксированные значения, которые поддаются экспериментальной оценке. Поскольку для любых физических величин, как правило, может быть разработана методика выполнения измерений, более точная чем применяемая, следует признать, что при наличии методов оценки погрешности измерений есть принципиальная возможность выявления и оценки «*a posteriori*» не только систематических, но и случайных погрешностей. Это нисколько не противоречит определению случайной погрешности как случайной величины в части невозможности предсказания ее конкретного значения.

В заключение следует отметить, что достаточно полные количественные оценки погрешностей можно получить только при наличии заведомо более точной информации об измеряемой физической величине.

7 Случайные погрешности измерений

7.1 Общие сведения

Согласно РМГ29-2013 случайная погрешность измерения $\overset{\circ}{\Delta}$ - составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных в определенных условиях. Причины возникновения случайных погрешностей разнообразны:

- случайные изменения самой измеряемой величины;
- трение и люфт в измерительных механизмах;
- попадание пыли и влаги в механизмы;
- пульсации напряжений источников питания;
- вибрации;
- воздействие внешних электрических и магнитных полей;
- изменение сопротивлений электрических контактов и т.д.

Даже если каждая из этих причин оказывает ничтожно малое воздействие на результат измерения, то их суммарное воздействие может вызвать заметную погрешность. Перечисленное (и не перечисленное) причины в каждый момент времени проявляют себя по-разному. Выявить закономерности их взаимодействия чрезвычайно трудно или невозможно. Они приводят к появлению погрешностей, которые относят к разряду случайных. Случайные погрешности не могут быть исключены и учтены при однократном измерении. Однако при многократном измерении их влияние может быть учтено. Используя специальные приемы и математический аппарат, можно выявить и оценить лишь границы (границы доверительного интервала), в пределах которых с некоторой вероятностью (доверительной вероятностью) находится истинное значение измеряемой величины.

При оценке случайных погрешностей полагают, что систематические погрешности в результатах измерений отсутствуют, например, исключены, т.е. $\Delta_c=0$.

Для любого результата измерения X можно записать

$$X = Q + \overset{\circ}{\Delta}.$$

Поскольку в этом выражении одно из слагаемых $\overset{\circ}{\Delta}$ является случайной величиной, то и результат измерения X будет также величиной случайной. Известно, что основной характеристикой любой случайной величины является **функция распределения (ФР) вероятностей**, которая устанавливает связь между возможными значениями случайной величины и вероятностями их появления при многократных наблюдениях. Существует две формы представления ФР - интегральная и дифференциальная.

Интегральная функция распределения $F(x)$ определяет вероятность того, что результат наблюдения X окажется меньшим некоторого текущего значения x , т.е.

$$F(x) = P \{ X < x \}.$$

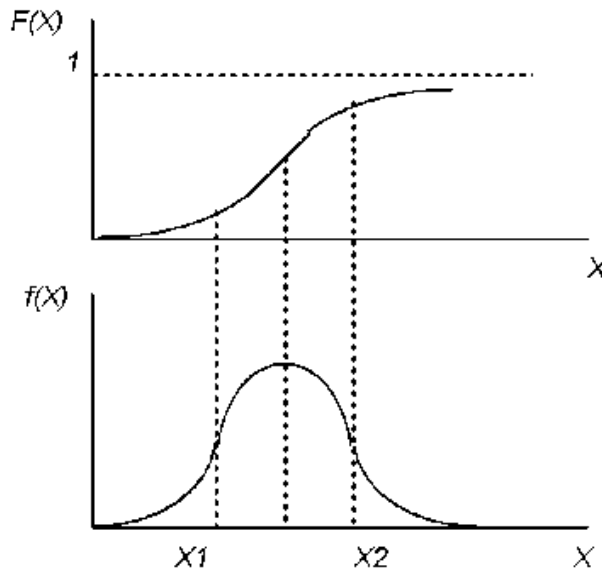


Рисунок 7.1 – графики интегральной и дифференциальной функции распределения

Свойства функции распределения.

1) ФР является положительной и неубывающей, а ее возможные значения заключены между 0 и 1, т.е.

$$F(x) = 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow -\infty, \quad F(x) = 1 \quad \text{при} \quad x \rightarrow 0.$$

2) Вероятность того, что случайная величина X находится в интервале от x_1 до x_2 равна разности вероятностей значений функции распределения на концах этого интервала, т.е.

$$P \{ x_1 \leq X \leq x_2 \} = F(x_2) - F(x_1).$$

На практике (это удобнее) часто используют **дифференциальное** представление ФР. Действительно, интервал (x_1, x_2) можно рассматривать как приращение случайной величины X : $\Delta x = x_2 - x_1$. Поскольку ФР существенно нелинейная, то одинаковым приращениям Δx будут соответствовать разные приращения $\Delta F(x)$, тогда

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F(x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx},$$

Функцию $f(x)$ называют **плотностью распределения вероятностей случайной величины (или плотностью вероятности)** и она является дифференциальной формой представления ФР, т.е.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

Следовательно, вероятность попадания случайной величины в интервал (x_1, x_2) равна

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

Функции распределения могут быть достаточно полно определены своими числовыми характеристиками, к которым относятся начальные и центральные моменты (их численное значение зависит от плотности вероятности). В теории погрешностей наибольший интерес представляют 1-й начальный момент $a_1(x)$, называемый математическим ожиданием результата измерения, и второй центральный момент $\mu_2(x)$, являющийся дисперсией результатов наблюдения:

1-й начальный момент

$$a_1(x) = M[X] = \int x f(x) dx = Q,$$

где $M[X]$ математическое ожидание результатов измерения.

В большинстве случаев математическое ожидание результатов измерения совпадает с истинным значением измеряемой величины, т.е. $a_1(x) = M[X] = Q$. Отсюда следует, что $M[X]$ имеет размерность случайной величины.

2-й центральный момент

$$\mu_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (X - M[X])^2 f(x) dx = \int \Delta^2 f(x) dx = D[X],$$

который называется дисперсией результатов наблюдения. Дисперсия характеризует рассеяние результатов наблюдения относительно математического ожидания.

Свойства дисперсии:

1. Дисперсия постоянной величины равна нулю, т.е. $D[C]=0$.
2. Постоянную величину при вынесении за знак дисперсии необходимо возводить в квадрат, т.е. $D[CX]=C^2 D[X]$.
3. Дисперсия суммы или разности двух независимых случайных величин, равна сумме их дисперсий, т.е. $D[X+Y]=D[X]+D[Y]$.

На практике дисперсией погрешности измерения пользоваться неудобно, поскольку она имеет размерность квадрата измеряемой величины.

Поэтому вводят понятие «**среднее квадратическое отклонение**» (СКО). Оно определяется как корень квадратный из дисперсии, взятый со знаком + и имеющую размерность измеряемой величины:

$$\sigma_x = +\sqrt{D[X]}.$$

Числовые параметры $M[X]$ и $D[X]$ являются детерминированными, а не случайными величинами. Для того, чтобы найти числовые характеристики, необходимо знание функций распределения.

Функцию распределения случайной величины (результата измерения) можно получить, выполнив бесчисленное множество наблюдений, что принципиально невозможно. При сколь угодно большом, но конечном значении наблюдений, возможно построение только приближенной ФР, а, следовательно, и приближенных значений математического ожидания и дисперсии. Эти приближенные значения в математической статистике называют **оценками**.

7.2 Оценки числовых характеристик измеряемой величины

Различают два вида числовых оценок измеряемой величины: **точечные**, которые выражаются одним числом и **интервальные**, определяемые на каком-то интервале. Наилучшим образом описывают оцениваемые параметры оценки, которые являются состоятельными, несмещенными и эффективными.

Оценку называют состоятельной, если при увеличении числа наблюдений она стремится к оцениваемому параметру:

$$O(\Pi) \xrightarrow{\Pi \rightarrow \infty} \Pi,$$

где O – оценка, Π – параметр.

Оценку называют несмещенной, когда математическое ожидание оценки параметра равно оцениваемому параметру:

$$M [O(\Pi)] = \Pi.$$

Оценку называют эффективной, если ее дисперсия меньше дисперсии любой другой оценки данного параметра:

$$D[O_j(\Pi)] < D[O_i(\Pi)], \text{ где } i=1 \dots n.$$

Задача статистической обработки результатов наблюдений при прямых измерениях согласно ГОСТ 8.207-76 формулируется следующим образом:

Пусть имеется ряд результатов из n измерений. Результаты измерений $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ содержат только случайную погрешность, т. е. $\Delta_c = 0$. Требуется найти оценку истинного значения измеряемой величины и параметр, характеризующий степень отклонения полученного результата. Решение

поставленной задачи предполагает нахождение оценок, которые разделяются на точечные и интервальные.

Точечные оценки. Хотя точечная оценка и является случайной величиной, на для их нахождения нет необходимости знания закона распределения. Нахождение точечных оценок основано на следующих опытных фактах:

погрешности измерения могут принимать непрерывный ряд значений;
при большом числе наблюдений погрешности одинаковых значений, но разных знаков, встречаются одинаково часто;
малые значения погрешности наблюдаются чаще, чем большие.

1) Оценка истинного значения измеряемой величины X .

Она определяется, как среднеарифметическая сумма результатов измерений

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

2) СКО результатов наблюдений

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

Эта оценка характеризует отклонение результатов отдельных наблюдений x_i от среднего значения \bar{X} .

3) СКО результатов измерений

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}.$$

Оно характеризует отклонение среднеарифметического \bar{X} от истинного значения Q .

Точечные оценки хотя и позволяют определить результат измерения и случайную погрешность, но они не характеризуют с какой вероятностью истинное значение действительно соответствует истинному. Этой цели служат интервальные оценки.

Интервальные оценки. При нахождении интервальной оценки необходимо найти интервал, в котором с заданной вероятностью находится истинное значение измеряемой величины. Такой интервал обозначается ε и называется доверительным, а вероятность – доверительной – P_d .

Для определения интервальных оценок необходимо знать закон распределения случайных величин. Законы распределения могут быть симметричными или несимметричными относительно центра распределения

погрешности. В метрологии наиболее распространены симметричные законы. Описание случайных погрешностей с помощью законов распределения является наиболее полным, но экспериментальное определение этих законов требует весьма больших затрат времени (например, необходимо выполнить бесконечное число измерений). На практике используют аналитические функции, наиболее близко аппроксимирующие реальные законы распределения случайных погрешностей. Примеры наиболее часто применяемых законов распределения.

Нормальный закон распределения (закон Гаусса). Случайная величина распределена по нормальному закону, если случайные отклонения вызваны одновременным воздействием большого числа независимых и случайных факторов. Причем влияние каждого из них незначительно. Такой закон в метрологии встречается чаще всего. Теоретическим обоснованием этого является центральная предельная теорема: распределение суммы n независимых случайных величин стремится к нормальному закону при $n \rightarrow \infty$. Строго говоря, такой закон получается при сложении неограниченного числа случайных величин. Однако уже при сложении 4-х – 5-ти случайных величин с разными законами распределения, получается суммарный закон, близкий к нормальному.

Для центрированных случайных величин, график плотности распределителя вероятностей нормального закона имеет вид:

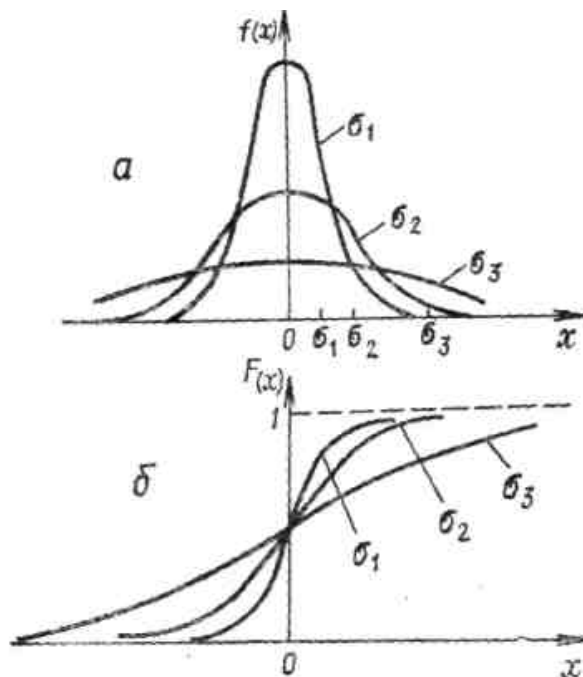


Рисунок 7.2 — Нормальный закон распределения

Для этого закона

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}},$$

Доверительный интервал находится по формуле:

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

где t_p – коэффициент Лапласа, который выбирается из таблиц по заданной вероятности P_d

$S_{\bar{x}}$ – СКО результатов измерений.

Для значений доверительной вероятности, определенных ГОСТ 8.207-76, коэффициент Лапласа выбирается из таблицы.

P_d	0,68	0,95	0,9973
t_p	1	1,95	3

Формулой с коэффициентом Лапласа можно пользоваться только в том случае, если число измерений $n > 30$. В случае, если $n < 30$, то используют соотношение:

$$\varepsilon = t_{pn} S_{\bar{x}},$$

где t_{pn} – коэффициент Стьюдента, который определяется не только по заданной вероятности, но зависит и от числа измерений n (количеством степеней свободы $k = n - 1$). Он выбирается так же из табулированных таблиц, но по заданным P_d и n . (таблица?)

Таблица - Коэффициенты Стьюдента $t_{pn}(P_d, n)$

д	n														
									0	1	2	3	4	5	6
,90	,31	,92	,35	,13	,02	,94	,89	,86	,83	,81	,80	,78	,77	,76	,75
,95	2,71	,30	,18	,78	,57	,45	,36	,31	,26	,23	,20	,18	,16	,14	,13
,99	3,66	,92	,84	,60	,03	,71	,50	,36	,25	,17	,11	,05	,01	,98	,95
,997	35,7 8	9,21	,22	,62	,51	,90	,53	,28	,09	,96	,85	,76	,69	,64	,59
д	n														
	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
,90	,75	,74	,73	,73	,72	,72	,72	,71	,71	,71	,71	,70	,70	,70	,64
,95	,12	,11	,10	,09	,09	,08	,07	,07	,06	,06	,06	,05	,05	,05	,96
,99	,92	,90	,88	,86	,85	,83	,82	,81	,80	,79	,78	,77	,76	,76	,58
,997	,54	,51	,48	,45	,42	,40	,38	,36	,34	,33	,32	,30	,29	,28	,00

7.3 Проверка принадлежности распределения к нормальному закону

Следует отметить, что этой методикой можно пользоваться только в том случае, если результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению. Полагают, что поскольку оценка истинных значений результатов измерений \bar{X} является среднеарифметическим, то распределение X близко к нормальному закону. Однако в ответственных случаях необходимо доказать принадлежность результатов измерений к нормальному закону распределения. С этой целью используют различные критерии согласия, суть которых сводится к обоснованию соответствия или несоответствия полученных при измерении результатов наблюдений какому-либо закону распределения. Для этого определенным образом систематизированные экспериментальные данные (результаты наблюдений) сравниваются с данными, которые получены для аналогичных условий расчетным способом для теоретического распределения, проверка на совпадение с которым и производится. В качестве теоретического распределения принято нормальное распределение. По результатам величины отклонения экспериментальных данных от теоретически рассчитанных и делается вывод, принадлежат ли результаты наблюдений нормальному закону распределения либо нет.

Стандартом ГОСТ 8.207-76 установлено, что

при числе наблюдений $n > 50$ проверка осуществляется по критериям Пирсона (χ^2 - «хи-квадрат») или Мизеса-Смирнова (Ω^2 «омега-квадрат»);

при $50 > n > 15$ проверка осуществляется при помощи составного критерия, который включает критерий 1 и критерий 2. Условием подтверждения гипотезы о принадлежности совокупности (выборки) результатов наблюдений к нормальному закону распределения является соблюдение обоих критериев. Если хотя бы один из критериев не соблюдается, то считается, что гипотеза не нашла своего подтверждения;

при $n < 15$ принадлежность к нормальному закону не проверяют.

При большом числе результатов наблюдения ($n > 40$) проверку нормальности распределения можно также решать с помощью гистограмм. Гистограмма – это графический метод представления данных, сгруппированных по частоте попадания в определённый интервал, представляющий график в виде столбиков и показывающий рассеяние и распределение данных. Ширина столбика – это интервал наблюдений, а высота – количество данных, приходящихся на тот или иной интервал, т.е. частота. По существу, гистограмма отображает распределение исследуемого показателя и позволяет оценить характер рассеивания показателя. Достоинства такого метода - наглядность, простота освоения и применения, способность лучше понять вариабельность, присущую процессу. Недостаток метода связан с тем, что интерпретация гистограммы, построенной по малым выборкам, не позволяет сделать правильные выводы.

7.4 Примеры законов распределения

Равномерный (прямоугольный) закон распределения. По этому закону распределяются случайные погрешности, обусловленные трением в опорах измерительных механизмов, округлением при отсчете показаний средства измерений, погрешности в приборах с цифровой индикацией и некоторые другие. Графики распределения показаны на рис 7.3, а математическая запись представлена формулой (7.1)

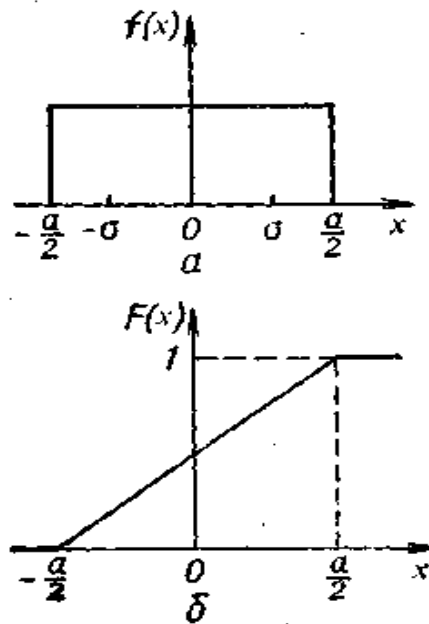


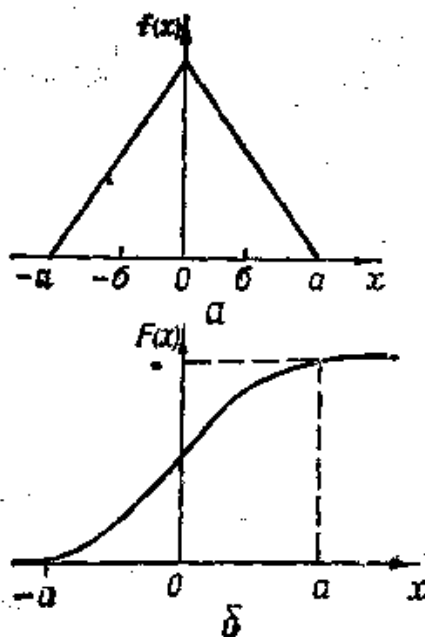
Рисунок 7.3 – Плотность вероятности и функция распределения

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } -\infty < x < -\frac{a}{2} \\ 1/a, & \text{при } -a/2 \leq x \leq a/2 \\ 0, & \text{при } a/2 < x < +\infty \end{cases}, \quad (7.1)$$

Для равномерного распределения дисперсия $D[X] = \frac{a^2}{12}$, а СКО определяется как $\sigma = \sqrt{\frac{a^2}{12}} = \frac{a}{2\sqrt{3}} \approx 0,58 \frac{a}{2}$.

Треугольный закон распределения (закон Симпсона). По такому закону распределены результаты сложения двух случайных величин распределенных по равномерному закону. Кроме того, по такому закону распределены погрешности, обусловленные дискретным характером отсчитываемых значений, например в приборах с цифровой индикацией.

Математическая запись треугольного закона представлена формулой



(7.4)

Рисунок 7.4

$$F(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ при } -\infty < x < -a \\ \frac{a+x}{a^2}, \text{ при } -a \leq x \leq a \\ \frac{a-x}{a^2}, \text{ при } 0 \leq x \leq a \\ 0, \text{ при } a < x < +\infty \end{array} \right\}$$

Дисперсия $D_z = \frac{a^2}{6}$, а СКО рассчитывается как $\sigma = \frac{a}{\sqrt{6}} \approx 0,41a$.

Кроме указанных могут применяться и другие законы распределения.

8 Обнаружение грубых погрешностей. НСП

8.1 Метод обработки результатов многократных наблюдений

При обработке результатов прямых многократных измерений и оценивания погрешности измерений следует руководствоваться требованиями ГОСТ 8.209-76. Согласно этому документу порядок расчетов следующий:

- 1) исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений;
- 2) вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения;
- 3) вычислить оценку среднего квадратического отклонения результата наблюдения;
- 4) проверить ряд измерений на наличие грубых погрешностей и при наличии исключить их и повторить расчеты, начиная с п. 1);
- 5) вычислить оценку среднего квадратического отклонения результата измерения;
- 6) проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению;
- 7) вычислить доверительные границы случайной погрешности (случайной составляющей погрешности) результата измерения;
- 8) вычислить границы неисключенной систематической погрешности (неисключенных остатков систематической погрешности) результата измерения;
- 9) вычислить доверительные границы погрешности результата измерения;
- 10) записать результат измерения в установленной форме.

Проверку гипотезы о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, следует проводить с уровнем значимости от 10% до 2%. Конкретные значения уровней значимости должны быть указаны в конкретной методике (методе) измерений.

Для определения доверительных границ погрешности результата измерения доверительную вероятность принимают равной 0,95.

В тех случаях, когда измерение нельзя повторить, помимо границ, соответствующих доверительной вероятности $P_d=0,95$, допускается указывать границы для доверительной вероятности $P_d=0,99$.

В особых случаях, например, при измерениях, результаты которых имеют значение для здоровья людей, допускается вместо $P_d=0,99$ принимать более высокую доверительную вероятность.

8.2 Обнаружение грубых погрешностей

Грубой погрешностью измерения (промахом) называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях.

Иными словами, это погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, который для данных условий резко отличается от

остальных результатов. К наиболее распространенным причинам грубых погрешностей можно отнести:

неправильный отсчет по шкале измерительного прибора;

неправильная запись результата измерений;

резкое изменение условий измерения (например, изменение питающего прибор электрического напряжения).

Основным способом недопущения грубых погрешностей являются повторные измерения. Часто промахи сразу видны в ряду измерений, и, если возможно, эксперимент следует повторить. Например, построив точечную диаграмму, можно визуально выявить результат, содержащий грубую погрешность. В противном случае наличие промаха необходимо доказать. Существует ряд критериев для вероятностной оценки промахов. Рассмотрим некоторые из них подробнее.

Критерий 3σ (три сигма) или критерий Райта. Этот критерий применим в случае, если число измерений $n > 20$. Его суть заключается в следующем: если значение измерения x_i превышает среднее значение результата измерения больше, чем на 3σ , то есть $|x_i - \bar{X}| > 3\sigma$, то такой результат относится к промахам и исключается из рассматриваемого ряда (σ – среднее квадратическое отклонение результатов наблюдения, ранее обозначенное как S_x . Отсюда и название критерия). Критерий трёх сигм применяют обычно для быстрого приближённого определения грубых ошибок в выборке. Он прост, нагляден и легко запоминается, при его применении не нужны таблицы.

Критерий Шовене. Данный критерий применяют в случае, если $n \leq 20$. Согласно этому критерию считают, что подозрительный результат x_i является промахом, если выполняется условие, приведенное ниже:

$$\text{Для } n=3, \quad \left| \bar{X} - x_i \right| > 1,6S_x,$$

$$n=6, \quad \left| \bar{X} - x_i \right| > 1,7S_x,$$

$$n=8, \quad \left| \bar{X} - x_i \right| > 1,9 S_x,$$

$$n=10, \quad \left| \bar{X} - x_i \right| > 2,0 S_x.$$

Критерий Романовского. Применяется в случае $n \leq 20$. Критерий заключается в проверке статистической гипотезы. Проверяемая гипотеза состоит в утверждении, что результат измерения x_i не содержит грубой погрешности. Для проверки гипотезы составляется соотношение

$$v_i = \frac{|\bar{x} - x_i|}{\sigma} < v_{\text{доп}}$$

Для нахождения $v_{\text{доп}}$ составлены таблицы, позволяющие при заданной доверительной вероятности P_d или уровне значимости $q = 1 - P_d$ определить его граничное значение при котором результаты измерения могут считаться не искажающими общие результаты измерения. При $v_i < v_{\text{доп}}$ гипотеза принимается, в

противном случае результат измерений может быть отброшен как содержащий грубую погрешность. Вероятность принятия этого решения равна P_d .

Таблица 8.1 – Предельные значения $\nu_{доп}$

Число наблюдений, n	Предельное значение $\nu_{доп}$ при уровне значимости q			
	0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,42	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71

Кроме перечисленных известны также и более обоснованные критерии аномальности при нормальном распределении, например, критерии Смирнова (Граббса), Диксона, Ирвина и другие.

8.3 Неисключенные систематические погрешности

Неисключённая систематическая погрешность (НСП) результата измерения, обозначаемая θ , является следствием предсказуемого воздействия известного количества влияющих величин на измеряемую физическую величину и включает несколько составляющих. В качестве влияющих величин могут быть приняты эффекты, вызванные несовершенством (или принятыми допущениями).

Несовершенство метода выполнения измерений (методическая погрешность) может проявляться в следующем:

отличием принятой физической модели объекта измерений от модели, адекватно отражающей его свойства, определяемое путем измерений;

влиянием изменений параметров функции зависимости информативного параметра вторичного процесса (или вторичной величины) от измеряемой величины (при использовании вторичного процесса или вторичной величины);

влиянием способов применения в МВИ средств измерений;

влиянием алгоритмов (формул) вычислений результатов измерений (при косвенных измерениях);

влиянием других факторов, не связанных со свойствами используемых средств измерений.

Влияние **свойств средства измерений** определяется, прежде всего, тем, что границы составляющих НСП принимаются по метрологическим характеристикам СИ, приведенным как в НТД, так и в документации на СИ (включая паспортные данные или данные свидетельства о поверке). При отсутствии документации на СИ отдельные составляющие погрешности СИ могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в различных источниках.

Влияние **погрешностей введенных поправок**. Ведением поправки, например, устраняется систематическая погрешность, обусловленная какой-нибудь одной причиной. Поскольку этих причин обычно несколько, то приходится вводить несколько поправок. Причем значения поправок определяются тоже с некоторой погрешностью. Таким образом, любой результат измерения содержит НСП и случайную составляющую погрешности измерения.

Учет неисключенных систематических погрешностей также определяется ГОСТ 8.207-76. В качестве границ составляющих НСП принимают, например, пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, если случайные составляющие погрешности пренебрежимо малы. При отсутствии данных о виде распределения случайных величин их распределения принимают за равномерные. При определении результирующей границы θ НСП ее отдельные составляющие θ_i рассматриваются как случайные величины.

1) Для **нормального** закона распределения θ_i

$$\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2},$$

где m - количество НСП,
 θ_i - граница i - ой НСП.

2) Если закон распределения НСП неизвестен, то их распределение принимают за **равномерное**.

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2},$$

где k - зависит от доверительной вероятности.

Для $P_d = 0,95$ $k = 1,1$.

Для $P_d = 0,99$ k зависит от числа m суммируемых НСП:

если $m > 4$, $k = 1,4$

если $m \leq 4$, k определяется по графику зависимости $k = f(m, l)$, $l = \theta_1 / \theta_2$ (рис.8.1).

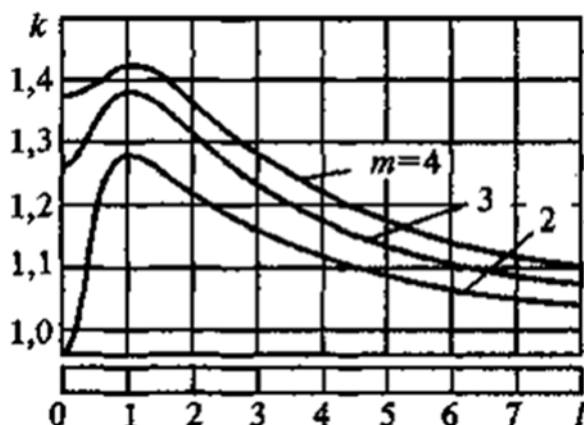


Рисунок 8.1 — График зависимости $k = f(m, l)$

При $m > 2$ вместо θ_1 принимают наиболее отличающуюся по числовому значению от других, а вместо θ_2 берут ближайшую к θ_1 . Доверительную вероятность для вычисления границ НСП принимают той же, что при вычислении доверительных границ случайной погрешности результата измерения.

Границы погрешности результата измерения определяют исходя из следующего.

Если соотношение

$$\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} < 0,8,$$

где θ - граница НСП, а $S_{\bar{x}}$ - СКО результата измерений, то пренебрегают НСП. Тогда граница погрешности результата измерения определяется как $\Delta = \epsilon$ (доверительный интервал).

Если

$$\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} > 8,$$

то пренебрегают случайными погрешностям, а граница погрешности результата измерения $\Delta = \theta$ (θ - граница НСП).

Если

$$0,8 \leq \frac{\theta}{S_{\bar{x}}} \leq 8,$$

то граница погрешности результата измерения определяется как $\Delta = KS_{\Sigma}$,

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

S_{Σ} – оценка суммарного СКО результатов измерения.

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S_{\bar{x}} + S_{\theta}},$$

где S_{θ} - оценка СКО суммы НСП.

Для равномерного закона распределения

$$S_{\theta} = \frac{\theta}{\sqrt{3}}, \quad S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\bar{x}}^2 + S_{\theta}^2}.$$

9 Оценка результатов косвенных измерений

9.1 Определение действительных значений и погрешностей косвенных измерений

В метрологической практике значительная часть измерений производится косвенным методом, когда значение измеряемой величины находится на основании известных зависимостей между этой величиной и другими величинами, найденными в результате прямых измерений. Например, мощность электрического тока, рассеиваемой на нагрузке, можно измерить прямым методом с помощью ваттметра, и косвенным методом, по измеренным значениям тока I и напряжения U : $P=IU$. Или определение плотности тела цилиндрической формы по результатам прямых измерений массы m , высоты h и диаметра цилиндра d , связанных с плотностью ρ уравнением: $\rho = m / (0,25\pi d^2 h)$.

Косвенные измерения сложнее прямых хотя бы потому, что требуют проведения прямых измерений и дополнительных расчетов. В большинстве случаев косвенные измерения проводятся в случаях невозможности измерения требуемой физической величины прямым методом, а иногда косвенные измерения обеспечивают более высокую точность.

Согласно РМГ 29, косвенным называется измерение, при котором искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной.

Для оценки результатов косвенных измерений разработаны различные подходы, которые зависят от вида функциональной зависимости (формулы косвенного измерения): линейной, нелинейной, для коррелированных погрешностей прямых и др.

Рассмотрим общий подход оценки результатов косвенных измерений и рассмотрим некоторые частные случаи.

Положим, функциональная зависимость f между Y - результатом косвенного измерения и результатами прямых измерений определяется выражением:

$$Y = f(x_1 \dots x_n), \quad (9.1)$$

где $x_1 \dots x_n$ - результаты прямых измерений (параметры),
 n - число измерений.

В формуле (9.1) известна функциональная зависимость f , а также действительные значения $x_{01} \dots x_{0n}$ ($x_i = x_{0i} \pm \Delta x_i$) результатов прямых измерений.

Необходимо найти действительное значение измеряемой величины Y_0 и показатель точности ΔY , т.е. оценить результат косвенного измерения и его погрешность.

Математически такая задача решается путем разложения функции косвенного измерения f в ряд Тейлора:

$$Y = \underbrace{f(x_{\partial_1} \dots x_{\partial_n})}_{Y + \Delta Y_{\Sigma}} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \Delta x_i^2 + \dots \quad (9.2)$$

Поскольку погрешности прямых измерений Δx_i малы, то те члены, где они возводятся в степень, будут еще меньше и ими можно пренебречь. Поэтому на практике ограничиваются двумя членами разложения. Тогда в первых двух слагаемых выражения (9.2) сосредоточены результаты косвенного измерения и его погрешность.

Оценка действительного значения согласно (9.2) определяется следующим образом

$$Y_{\partial} = f(x_{\partial 1} \dots x_{\partial n}). \quad (9.3)$$

С точки зрения математической статистики это выражение имеет наилучшую эффективность, состоятельность и несмещенность.

Оценка границ погрешности осуществляется путем вычитания выражения (9.3) из выражения (9.2), в результате чего получим

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (9.4)$$

Это выражение представляет собой частную производную формулы косвенного измерения \underline{Y} по параметру прямого измерения x_i . Оно определяет влияние погрешности Δx_i каждого результата прямого измерения на результат погрешности косвенного измерения ΔY .

Непосредственно выражением (9.4) пользоваться нельзя, поскольку Δx_i включают в себя как случайную, так и систематическую составляющие. Но они могут быть представлены своими дисперсиями D_{x_i} .

Положим Δx_i - случайные величины, независимые и малые, тогда согласно выражению (9.4) для дисперсий можно записать:

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 D_{x_i} \quad (9.5)$$

Перейдя от дисперсий к СКО, получим

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \ell_i^2} \quad (9.6)$$

$$l_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i}$$

где l_i - частное СКО.

Если закон распределения ΔX_i нормальный и доверительный интервал определяется для одной и той же доверительной вероятности, то для погрешности косвенного измерения согласно формуле (9.6) можно записать:

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (9.7)$$

$$E_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$$

где E_i - частная погрешность.

Частная погрешность имеет размер искомой величины и отражает вклад погрешности Δx_i в погрешность результата косвенного измерения ΔY . Знание частных погрешностей позволяет правильно организовать выполнение косвенных измерений. Это обеспечивает снижение влияния погрешностей тех параметров, которые вносят наибольший вклад в общую погрешность результата.

Следует отметить, что при практических расчетах в выражении (9.7) необходимо учитывать доверительную вероятность P_d путем умножения на коэффициент k :

$$\Delta Y = k \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2}$$

где $k=1,0$ при $P_d=0,9$,
 $k=1,1$ при $P_d=0,95$,
 $k=1,4$ при $P_d=0,99$.

Отметим несколько важных особенностей.

1). Выражение (9.7) справедливо только для нормального закона распределения. Однако оно может быть применимо и для других законов, т. к. на практике находят приблизительные значения параметров x_i и допустимая при этом погрешность будет вполне удовлетворительной.

2). До сих пор мы считали, что Δx_i малы и независимы. В случае их зависимости (корреляции), необходимо учитывать связь между ними. Например, если x_1 и x_2 зависимы, то СКО определяется формулой

$$\sigma_y = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2rl_1l_2}$$

Где r – коэффициент корреляции (связи): $-1 < r < 1$.

Нахождение коэффициента r представляет значительные сложности. Приближенно можно считать, что если связей нет, то $r = 0$. Если корреляционная связь несущественна, то полагают $r \leq |0,7|$.

3). Если Δx_i - систематические, то выражение для расчета погрешности косвенного измерения упрощается:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n E_i \quad (9.8)$$

9.2 Частные случаи

Частные случаи зависят от вида функциональной зависимости косвенного измерения и позволяют упростить расчеты, связанные с нахождением их погрешностей.

1. Положим, что результат косвенного измерения Y зависит только от одного результата прямого измерения x :

$$Y = ax^m,$$

где a – постоянный множитель;

m - показатель степени.

Тогда погрешность косвенного измерения определяется как:

$$\Delta Y = a m x^{m-1} \Delta x.$$

Например. Измеряется мощность электрического тока протекающего через известное сопротивление R , величина которого постоянна, т.е. $R = \text{const}$. Значение мощности измеряется косвенно по показанию амперметра. Так же задано ΔI и I_d . Требуется найти действительное значение результата косвенного измерения P_d и погрешность ΔP .

Действительное значение определяем как $P_d = I_d^2 R$. А воспользовавшись частным случаем находим погрешность: $\Delta P = 2RI_d \Delta I$.

2. Если результат косвенного измерения представляется в виде произведений результатов прямых измерений, то в этом случае более удобно находить относительную погрешность.

$$Y = \prod_{i=1}^n x_i^{q_i}$$

$$\text{Тогда } \delta Y = \sqrt{(q_1 \delta_{x_1})^2 + \dots + (q_n \delta_{x_n})^2}, \quad \Delta Y = Y_d \delta y$$

Например. Мощность измеряется косвенным методом посредством измерения тока и напряжения.

Найти P_d , ΔP

Формула косвенного измерения согласно закону Ома $P = IU$. Тогда $P_d = I_d \cdot U_d$.

$$\delta_P = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2}, \quad \delta_I = \frac{\Delta I}{I_d}, \quad \delta_U = \frac{\Delta U}{U_d}, \quad \Delta P = P_d \delta P$$

3. Если результат косвенного измерения представить в виде суммы одинаковых результатов прямых измерений

$$y = a_1 x_1 + \dots + a_n x_n,$$

То погрешность косвенного измерения определится как:

$$\Delta Y = \sqrt{(a_1 \Delta x_1)^2 + \dots + (a_n \Delta x_n)^2}$$

Пример: измерение расстояния l_0 между центрами двух отверстий штангенциркулем (рис.9.1).

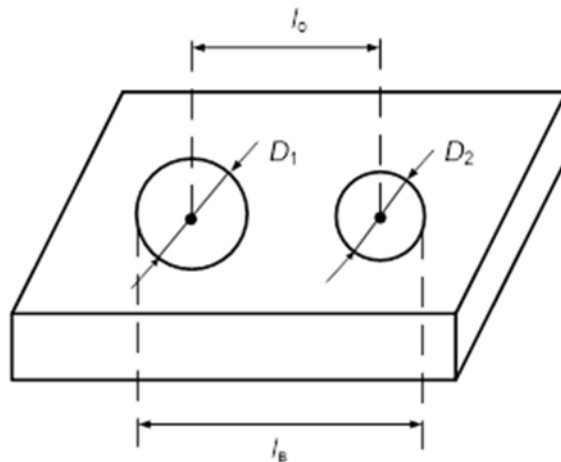


Рисунок 9.1

Измерение производилось одним штангенциркулем. Формула косвенного измерения в этом случае

$$l_0 = l_B - \frac{D_1 + D_2}{2} = l_B - \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2}.$$

Воспользовавшись частным случаем для погрешности измерения запишем:

$$\Delta l_0 = \sqrt{\Delta_{l_B}^2 + \left(\frac{\Delta_{D_1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{D_2}}{2}\right)^2};$$

Поскольку измерения проводились одним штангенциркулем, то $\Delta_{l_B} = \Delta_{D_1} = \Delta_{D_2} = \Delta_\ell$. Тогда $\Delta_{l_0} = \Delta_\ell \frac{\sqrt{6}}{2}$. Из этого примера видно, что погрешности косвенных измерений будут больше чем погрешности прямых измерений.

9.3 Критерий ничтожных погрешностей

Непосредственно из выражения (9.7) следует, что каждое значение Δx_i по разному влияет на погрешность результата косвенного измерения Δy . Если учесть, что Δy должна округляться до 1 или 2 значащих цифр, то очевидно, что существуют такие значения Δx_i , учет которых не влияет на результирующую погрешность Δy (результат ее округления).

Обычно погрешность округления составляет не более 5%. Обозначим E_k – частная погрешность, которая изменяет результирующую погрешность косвенного измерения менее чем на 5%. Тогда приближенное значение

погрешности округления можно найти вычитанием из подкоренного выражения (9.7) квадрата частной погрешности E_k .

$$\frac{\Delta y - \sqrt{\Delta y^2 - E_k^2}}{\Delta y} \leq 0,05.$$

Отсюда $E_k < 0,31\Delta y$. Это и есть критерий ничтожных погрешностей. Его следует понимать следующим образом. Если какая-либо частная погрешность изменяет результирующую погрешность косвенного измерения Δy менее чем в 3 раза, то ею можно пренебречь.

10 Метрологические характеристики средств измерений

10.1 Метрологические характеристики средств измерений

Номенклатура метрологических характеристик СИ, правила их выбора определены ГОСТ 8.009-84 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

Согласно РМГ 29 метрологическая характеристика (МХ) СИ - характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений.

Для каждого типа средств измерений устанавливают свои метрологические характеристики. Поэтому в РМГ 29 предусмотрено понятие нормируемые метрологические характеристики типа средства измерений - совокупность метрологических характеристик данного типа СИ, устанавливаемая нормативными документами на СИ. А совокупность метрологических характеристик средства измерений, влияющих на точность измерения, называются точностными характеристиками СИ (погрешность СИ, нестабильность, смещение нуля и др.).

Знание метрологических характеристик позволяет решать следующие основные измерительные задачи:

определение результатов измерений и оценка инструментальной составляющей погрешности измерений;

расчет МХ каналов измерительных систем, состоящих из средств измерений с нормированными метрологическими характеристиками;

оптимальной выбор средства измерений, обеспечивающего заданную точность измерений;

равнение СИ между собой по их метрологическим характеристикам.

Номенклатура метрологических характеристик определена в ГОСТ 8.009-84 и включает следующие категории.

1) Характеристики, предназначенные для определения результата измерения (функция преобразования, значение однозначной или значения многозначной меры, цена деления шкалы и т.п.). Например, градуировочная характеристика СИ - зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально. Градуировочная характеристика может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы.

2) Характеристики погрешности СИ (абсолютная, относительная, приведенная).

3) Характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам (изменение погрешности СИ с изменением влияющих факторов):

4) Динамические характеристики СИ:

- полные динамические характеристики (переходная, импульсная, амплитудно-частотная характеристики, и др.);

- частичные динамические характеристики (время установления, время нарастания, неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), характеристики аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и др.);

5) Характеристики взаимодействия СИ с объектом измерения. Например, для СИ электрических величин – это входной импеданс (параметры входа):

$$Z_{\text{вх ном.}} \pm \Delta Z, (R_{\text{вх}} = (10 \pm 1) \text{ МОм}); Z_{\text{вх доп.}}; (C_{\text{вх}} < 15 \text{ пФ}).$$

6) Неинформативные параметры выходного сигнала средства измерений.

10.2 Погрешности СИ

Для обеспечения единства измерений и взаимозаменяемости средств измерений их метрологические характеристики нормируются и регламентируются. Под нормированным значением понимается погрешность, являющаяся предельной для данного типа средств измерения.

Модели погрешности

Погрешности СИ $\Delta_{\text{СИ}}$ сложным образом зависят от измеряемой величины. Однако для установления нормы на эту погрешность (для ее нормирования) на практике выбирают достаточно простые модели.

Модель I – аддитивная (рис.?а):

$$\Delta_{\text{СИ}} = \pm a.$$

Модель II – мультипликативная (рис.?б):

$$\Delta_{\text{СИ}} = \pm bX.$$

Модель III – аддитивно-мультипликативная (рис.?в):

$$\Delta_{\text{СИ}} = \pm (a + bX),$$

где a – аддитивная составляющая погрешности СИ;

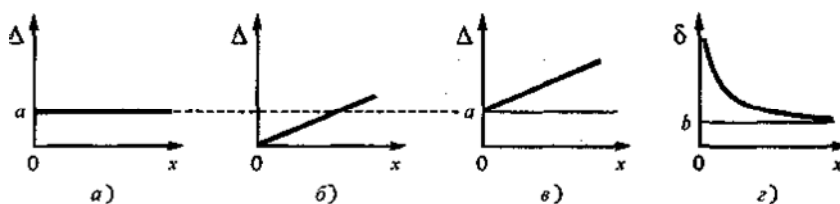
b – число, определяющее мультипликативную составляющую погрешности СИ;

X – значение измеряемой величины.

Модель IV – сложная (рис.?г):

$$\Delta_{\text{СИ}} = \pm \varphi(X),$$

где $\varphi(X)$ задается таблицей, формулой, графиком.



a -аддитивная; b -мультипликативная; v -сумма аддитивной и мультипликативной; $г$ - относительная суммарная (сложный закон)

Наиболее предпочтительными при нормировании погрешностей являются модели I – III.

Основная и дополнительные погрешности

Погрешность СИ изменяется под воздействием внешних факторов, таких, как:

- температура;
- влажность;
- давление;
- положение СИ;
- параметров питающей сети;
- неинформативных параметров;
- внешних электромагнитных полей и др.

Под воздействием этих факторов $\Delta_{СИ}$ изменяется. Однако в изменении $\Delta_{СИ}$ есть область, в которой она минимальна и практически не зависит от внешних влияющих факторов. Такая область называется нормальной областью или областью нормальных условий (НУ). В этой области погрешность СИ называется основной $\Delta_{осн}$. В качестве примера на рис. показан график изменения погрешности средства измерений в зависимости от изменения температуры. Область, в которой погрешность СИ нормируется, называется рабочей областью или областью рабочих условий (РУ), а погрешность в ней называется дополнительной $\Delta_{доп}$.

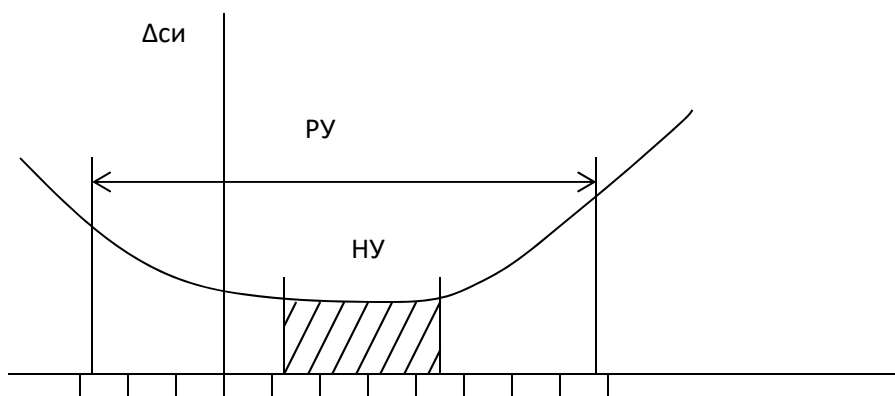


Рисунок 10.1 — Области рабочих и нормальных условий

РУ – область изменения влияющих величин, в пределах которой метрологические характеристики СИ нормированы. Рабочие условия измерений: должны выполняться во время измерения для того, чтобы СИ функционировали в соответствии со своим назначением.

НУ – часть РУ, в пределах которой изменение метрологических характеристик СИ за счет изменения влияющих величин несущественно ($\Delta_{СИ} \approx \text{const}$). Нормальные условия предписаны для оценивания характеристик СИ или для сравнения результатов измерений. Как видно из графика (см.рис ?), в нормальных условиях температуры погрешность СИ практически не изменяется.

Исходя из этого, основная погрешность СИ $\Delta_{осн}$ – это погрешность СИ, используемого в НУ. Дополнительная погрешность $\Delta_{доп}$ – это изменение погрешности СИ при отклонении условий измерений от нормальных.

Обычно нормируют отдельно $\Delta_{осн}$ и $\Delta_{доп}$.

Для контроля соответствия реальной погрешности установленной норме необходимо периодически проводить поверку либо калибровку СИ. В этом случае возможны два подхода:

полагают, что в пределах заданного интервала времени (1 год, 2 года и т.д.) реальная погрешность не выйдет за пределы нормы;

нормируют изменения погрешности СИ во времени. Однако в этом случае сложно учесть условия и интенсивность использования СИ.

Нормирование погрешностей

Нормирование основной погрешности осуществляют в зависимости от выбранной модели.

В виде **абсолютной** погрешности:

$\Delta_{СИ} = \pm a$, для I модели, задают число a ;

$\Delta_{СИ} = \pm (a + bX)$, для III модели, задают числа a, b ;

$\Delta_{СИ} = f(X)$, для IV модели, задают функцию $f(X)$.

В виде **относительной** погрешности:

$\delta_{СИ} = \pm b$, для II модели, задают число b ;

$\delta_{СИ} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_K}{X} \right| - 1 \right) \right]$, для III модели, задают числа c, d ; X_K – предел измерения.

$\delta_{СИ} = f(X)$, для IV модели, задают функцию $f(X)$.

В виде **приведенной** погрешности.

Приведенная погрешность определяется формулой $\gamma = \Delta / X_N$, где X_N – нормирующее значение. γ – безразмерная величина, как и δ . Её могут выражать в процентах. Обычно для приведенной погрешности γ выбирают модель I, а в качестве X_N выбирают значение предела измерения X_K :

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_k} \cdot 100\% = P$$

Погрешность нормируют указанием числа P . Иногда используют другие правила выбора X_N . Они указаны в ГОСТ 8.401-80. Как правило, X_N выбирается в зависимости от характера шкалы измерительного прибора. На рис. показаны примеры выбора нормирующего множителя.

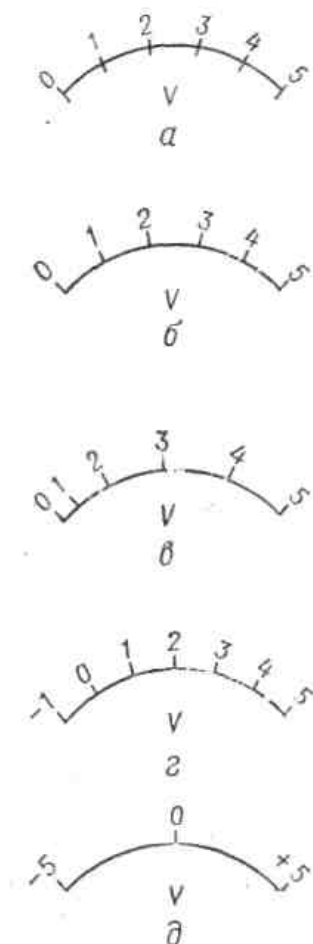


Рисунок 10.2 — Выбор нормирующего множителя. а, б, в, г – $X_N = 5$ В, д - $X_N = 10$ В.

Для СИ с **существенно неравномерной шкалой** (например, омметров) выбирают I модель погрешности, выраженной в единицах длины шкалы Δl , а в качестве X_N используют длину рабочего участка шкалы l_p . (или ее участка). Погрешность нормируют также указанием числа P :

$$\gamma = \frac{\Delta l}{l_p} \cdot 100\% = P$$

На рис. 10.2 показан пример нахождения погрешности средства измерения – омметра. Из паспортных данных омметра находим $l_p = 69$ мм. Определяем

$$\Delta l = \frac{\gamma l_p}{100\%}.$$

Далее, на шкале омметра в районе нахождения стрелочного указателя (см. рис. 10.3) необходимо отложить полученное значение Δl в миллиметрах и определить какое количество Ом «помещается» в отрезке Δl . Это и есть погрешность омметра.

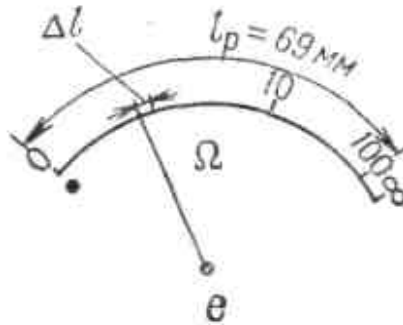


Рисунок 10.3 — Определение погрешности омметра

Для **логарифмической** шкалы относительную погрешность находят по формуле:

$$\delta = \left(10^{\frac{\gamma n}{10}} - 1 \right) 100,$$

n – число декад (не обязательно целое) в пределах рабочего участка шкалы.

Если прибор проградуирован в логарифмических единицах (дБ, Нп), то погрешность также формируют в этих единицах. Для удобства определения погрешности используют графики, полученные по этой формуле.

Числа a, b, c, d, P выбираются из ряда $(1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6)10n$, где $n = 1; 0; -1; -2...$

Нормирование дополнительной погрешности.

Дополнительные погрешности измерения $\Delta_{\text{доп}}$ нормируют тремя способами:

задают $\Delta_{\text{доп}} = \text{const}$ на всей области РУ;

задают $\Delta_{\text{доп}} = \text{const}$ для постоянных интервалов влияющих величин в рабочей области;

задают функцию влияния, чаще всего линейную (зависимость дополнительной погрешности от влияющей величины), например

$$\Delta_{\text{доп}} = a_{\text{вл}}(x_{\text{ру}} - x_{\text{ну}}),$$

где $a_{\text{вл}}$ – известный коэффициент влияния

$x_{\text{ну}}$ – значение влияющей величины в нормальных условиях,

$x_{\text{ру}}$ – значение влияющей величины в рабочих условиях.

Результирующую погрешность средства измерений в рабочих условиях вычисляют в соответствии с правилами суммирования неисключенной систематической погрешности:

$$\Delta_{СИ_{рв}} = k \sqrt{\Delta_{осн}^2 + \sum_{i=1}^r \Delta_{доп_i}^2}.$$

где k - зависит от доверительной вероятности.

Иногда у средств измерений не выделяют область нормальных условий, поэтому погрешность нормируют только в рабочих условиях.

10.3 Классы точности СИ

Класс точности – обобщенная характеристика данного типа средств измерений, как правило, отражающая их уровень точности и выражаемая точностными характеристиками средств измерений.

Класс точности обычно обозначается числом или символом, принятым по соглашению. Класс точности дает возможность судить о значениях инструментальных погрешностей или инструментальных неопределенностей средств измерений данного типа при выполнении измерений. В зависимости от способа нормирования погрешности в документации и на самом СИ наносят специальное обозначение.

Класс точности является характеристикой средства измерения, но не указывает непосредственно на значение погрешности измерения. Тем не менее, знание класса точности позволяет оператору приблизительно оценить границы, в пределах которых заключены погрешности измерения. При этом предполагается, что в сравнении с погрешностью средства измерений другие составляющие погрешности вносят меньший вклад в суммарную погрешность измерения. На рис.10.4 показаны примеры обозначения классов точности средств измерений, а также формулы и примеры определения пределов допускаемой погрешности.

Обозначение классов точности средств измерений

Формула для определения пределов допускаемой погрешности	Примеры пределов допускаемой основной погрешности	Обозначение класса точности	
		В документах	На средствах
Абсолютная погрешность			
$\Delta = \pm a$	$\Delta = \pm 2 \Gamma_{\text{ц}}$	Класс точности М	М
$\Delta = \pm(a + bx)$	$\Delta = \pm(2 + 0,03 f) \Gamma_{\text{ц}}$	Класс точности С	С
Приведенная погрешность			
$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} = \pm p$	$\gamma = \pm 1,5\%$	Класс точности 1,5	1,5
	$\gamma = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	0,5 (для СИ с неравномерной шкалой)
Относительная погрешность			
$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm q$	$\delta = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	0,5
$\delta = \Delta/x = \pm [c + d(x_k/x - 1)]$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01(x_k/x - 1)]\%$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01

Рисунок 10.3 — Обозначение классов точности средств измерений

11 Основы концепции неопределённостей

11.1 Общие сведения

В 1993 году по инициативе семи международных организаций:

Международного бюро мер и весов (BIPM);

Международной электрической комиссии (IEC);

Международной организации по стандартизации (ISO);

Международной организации законодательной метрологии (OIML);

Международного союза по чистой и прикладной химии (IUPAC);

Международного союза по чистой и прикладной физике (IUPAP);

Международной федерации клинической химии (IFCC)

была предложена новая концепция для показателя точности результатов измерений, которую положили в основу разработанного документа «Руководство по выражению неопределенности измерения».

После издания в 1993 г. Руководство постепенно приобрело статус международного регламента выражения качества измерений, который привнес согласованность в научные и технологические измерения и всемирное единство в оценке и выражении неопределенности в измерениях. Цели руководства:

обеспечить полную информацию по составлению отчетов о неопределенностях измерений;

предоставить основу для международного сличения результатов измерений;

предоставить универсальный метод для выражения и оценивания неопределенности результата измерения, применимый ко всем видам измерений и всем типам данных, используемых при измерениях.

Таким образом, руководство дает универсальный метод выражения точности измерений в виде оценки неопределенности измерений, выполненных в любом месте мира, любым СИ, ко всем видам измерений, любую ФВ с различным уровнем точности.

Концепция неопределенности заключается в следующем. В теории погрешностей описанием измеряемой величины являются истинное значение Q , действительное значение X_d – вместо истинного и погрешность измерения Δ . При измерениях истинное значение величины не известно. Эти понятия в концепции неопределенностей не вводятся (при этом подразумевается, что истинное (действительное) значение величины существует, поскольку признается, что целью измерения является нахождение этого значения). Однако реально результат измерений (случайно) может оказаться очень близким к истинному значению. То есть он может иметь фактически очень малую реальную погрешность. И, в то же время, доверяя этот результат может не вызывать. Получается, что точно оценить погрешность измерений в соответствии с ее определением невозможно. Определение погрешности существует само по себе, а найденные, реальные погрешности – сами по себе. Возникла необходимость устранения этого противоречия. Необходимо было либо изменить определение погрешности, либо поменять порядок ее расчета. Поэтому Руководством введено в обращение понятие

«неопределенности» как характеристики качества измерений. В отличие от погрешности измерения, которая «привязана» к неизвестному истинному значению, неопределенность измерения «привязана» к измеренному значению физической величины, которое известно. При этом термин «неопределенность» вводится в двух смыслах: как сомнение, неполное знание о значении измеряемой величины после проведения измерений и для количественных характеристик этого неполного знания.

Неопределенность измерения есть параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

В качестве характеристик неопределенности принимаются:

стандартная неопределенность, которая является аналогом СКО погрешности измерений;

расширенная неопределенность, являющаяся аналогом доверительных границ (доверительного интервала) погрешности измерений.

Отечественные нормативные документы практически не используют понятия «неопределенность измерения» и «характеристики неопределённости». Используется традиционный подход – «погрешность» и «характеристики погрешности». В настоящее время происходит внедрение положений Руководства в отечественные нормативные документы.

11.2 Классификация неопределенностей

Неопределенность измерения может быть следствием двух причин:

- 1) рассеяния результата измерения при многократном повторении измерительной процедуры, что является объективным законом природы;
- 2) отсутствия необходимой информации об измерениях.

Аналогично погрешностям, неопределенности измерений также классифицируются по некоторым признакам.

По способу выражения

Абсолютная неопределенность измерения – неопределенность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

Относительная неопределенность результата измерений – отношение абсолютной неопределенности к результату измерений.

По источнику возникновения

инструментальные, методические, субъективные.

По характеру проявления погрешности измерения разделяют на систематические, случайные и грубые. В Руководстве отсутствует классификация неопределенностей по этому признаку. В самом начале документа указано, что перед статистической обработкой рядов измерений все известные систематические погрешности должны быть из них исключены. Поэтому деление неопределенностей на систематические и случайные не вводилось. Зато вводится их классификация **по способу оценивания неопределенности**.

1) Неопределенность, оцениваемая по типу А (**неопределенность типа А**). Неопределенность, которую оценивают статистическими методами на основе результатов ряда измерений;

2) Неопределенность, оцениваемая по типу В (**неопределенность типа В**). Неопределенность, которую оценивают нестатистическими методами на основе априорной нестатистической информации.

Деление погрешностей на систематические и случайные обусловлено природой их возникновения и проявления, а деление неопределенностей по типу А и по типу В обусловлено методами их получения при расчете.

Таким образом, новшествами Руководства являются:

отказ от использования понятий «погрешность» и «истинное значение измеряемой величины» в пользу понятий «неопределенность» и «оцененное значение измеряемой величины»;

переход от классификации погрешностей по характеру проявления на случайные и систематические к другому делению – по способу оценивания неопределенностей измерений (по типу А – методами математической статистики и по типу В – другими методами).

Общие правила оценивания и представления неопределенности измерения применительно к широкому спектру измерений установлены в ГОСТ 34100.3-2017 «Руководство по выражению неопределенности измерения». Смысл основных понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения» и производных от них терминов уточнен в рекомендациях по межгосударственной стандартизации РМГ 91-2009 «Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Там же даны рекомендации по логически непротиворечивому совместному применению этих понятий в различных метрологических задачах и предназначены для использования в законодательной и прикладной метрологии. В качестве примера в таблице ? приведено соответствие между терминами теории погрешностей и концепции неопределенности.

Таблица 11.1 – Термины-аналоги теории погрешностей и концепции неопределенности.

Классическая теория погрешности	Концепция неопределенности
Погрешность результата измерения	Неопределенность результата измерения
Случайная погрешность	Неопределенность, оцениваемая по типу А
Неисключенная погрешность	Неопределенность, оцениваемая по типу В
Среднеквадратическое отклонение погрешности результата измерений	Стандартная неопределенность результата измерения
Доверительные границы результатов измерения	Расширенная неопределенность результата измерения
Доверительная вероятность	Вероятность охвата (покрытия)
Коэффициент (квантиль) распределения погрешности	Коэффициент охвата (покрытия)

11.3 Оценивание неопределенностей

В настоящее время разработаны различные рекомендации и пособия, позволяющие осуществлять работы по оцениванию неопределенности при решении различных метрологических задач: калибровке эталонов и СИ, при проведении измерений и испытаний, при сличении эталонов и стандартных образцов и др. Белорусским государственным институтом метрологии также было подготовлено пособие, дающее практические методические рекомендации по расчету неопределенностей. Весь процесс представляется в виде восьми практических шагов:

- 1) описание измерения и составление его модели;
- 2) оценивание значений и стандартных неопределенностей входных величин;
- 3) анализ корреляций;
- 4) составление бюджета неопределенности;
- 5) расчет значения выходной величины;
- 6) расчет стандартной неопределенности выходной величины;
- 7) расчет расширенной неопределенности;
- 8) представление конечного результата измерения.

1). Описание измерения и составление его модели

В большинстве случаев измеряемая величина Y не является прямо измеряемой, а зависит от N других измеряемых величин X_1, X_2, \dots, X_N . Эти влияющие величины воздействуют на нее и преобразуют ее в ту величину, которую показывает средство измерения (на отсчетном устройстве или индикаторе) - X_{ind} . Таким образом, измеряемую величину Y представляют как:

$$Y=f(X_{ind}, X_1, X_2, \dots, X_N),$$

где X_i ($i=1, 2, \dots, N$) называются **входными величинами**, а измеряемая величина Y называется **выходной величиной**.

Сами входные величины X_i могут, в свою очередь, зависеть от других величин w , включая поправки и поправочные коэффициенты на систематические погрешности, что ведет к сложной функциональной зависимости:

$$X_1 = g_1(w_1, w_2, \dots, w_k),$$

$$X_2 = g_2(z_1, z_2, \dots, z_l).$$

В более простом виде, выходная величина может быть выражена просто как:

$$Y = x + C_1 + C_2 + \dots + C_j$$

где C_k ($k=1, 2, \dots, j$) – это поправки, например, для оператора, условий окружающей среды, лаборатории и т. д.

Следует отметить, что стадия моделирования измерения является чрезвычайно важной. Нет четкого правила о том, как необходимо составлять модель измерения. Но есть некоторые рекомендации:

основными исходными данными для составления модели являются: объект измерения, метод измерения (непосредственной оценки, сравнения с мерой), методика измерения, схема или принцип измерения прибора;

важно представить физический принцип измерения (вплоть до полного устройства средства измерения) и всю цепь преобразования измеряемой величины в процессе ее измерения;

функция модели измерения f может описывать одновременно метод измерения и алгоритм оценки, если измеряемая величина определяется как расчетное значение (например, косвенное измерение);

необходимо принимать во внимание особенности шкал или табло средств измерений, разрешающую способность, а также чувствительность приборов;

математическая модель должна всегда пересматриваться, когда наблюдаемые данные показывают, что модель неадекватна;

функцию модели можно определить экспериментально. Она также может существовать как алгоритм, который реализуется численно или в компьютерной программе, когда проводится числовая обработка измерения. Она может состояться как комбинация из всех этих форм.

Следует отметить, что процесс моделирования может быть бесконечным и всегда нужно находить баланс между тщательностью составления модели и необходимой точностью. Также следует учитывать экономический фактор. В самом «удобном» случае тщательность анализа входных величин, а также уровень, до которого математически необходимо моделировать процесс измерения может определяться требованиями заказчика, требованиями по точности метода измерения, величиной допуска для измеряемой величины Y .

Набор входных величин можно разделить на две группы.

Первая группа - это величины, чьи значения и неопределенности определяются непосредственно в текущем измерении. Эти значения и неопределенности можно получить, например, в результате одного наблюдения, либо повторных наблюдений, либо заключения, основанного на опыте. Они могут требовать определения поправок в показания прибора и поправок на влияющие величины такие, как окружающая температура, атмосферное давление и влажность.

Вторая группа - величины, чьи значения и неопределенности вносятся в измерение из внешних источников, таких как величины, связанные с аттестованными эталонами, стандартными образцами или стандартными справочными данными.

2). Оценивание значений и стандартных неопределенностей входных величин

Для каждой величины X_i , входящей в уравнение модели, необходимо определить оценку x_i и стандартную неопределенность $u(x_i)$. Оценками входных величин, обозначаемыми в общем виде малыми буквами ($x_1, x_2 \dots x_N$) являются их математические ожидания. Стандартная неопределенность $u(x_i)$, связанная с оценкой измеряемой величины x_i , является стандартным отклонением величины. При этом каждую входную оценку x_i и связанную с ней стандартную неопределенность $u(x_i)$ получают из распределения вероятностей входной

величины X_i . В зависимости от имеющейся информации о величине X_i способы оценки стандартных неопределенностей подразделяются на: по типу А и типу В.

По типу А оценивание стандартной неопределенности основывается на методах статистической обработки данных, таких как:

расчет стандартного отклонения и среднего значения на основании серии наблюдений;

использование метода наименьших квадратов;

проведение дисперсионного анализа и т. п.

Если измерительная ситуация является достаточно сложной, необходимо получить консультацию у эксперта по статистике.

Если для измеряемой величины q были получены n независимых наблюдений q_1, q_2, \dots, q_n , то ее оценкой будет среднее арифметическое значение:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

Стандартная неопределенность измерения оценивается как стандартное отклонение среднего значения:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}$$

$S(\bar{q})$ – СКО результатов измерений.

$$S(\bar{q}) = S_q / \sqrt{n} .$$

Оценивание неопределенности **по типу В** основывается на всей доступной информации о возможной изменчивости X_i :

данные предварительных измерений;

данные, полученные в результате опыта, или общие знания о поведении и свойствах соответствующих материалов и приборов;

спецификация изготовителя;

данные в свидетельствах о калибровке и в других сертификатах;

данные справочных данных.

Правильное использование фонда доступной информации для оценивания стандартной неопределенности по типу В требует интуиции, основанной на опыте и общих знаниях, и является мастерством, которое приходит с практикой.

Имеющуюся информацию и знания или даже предположения о величинах X_i необходимо правильно описать с помощью распределения вероятностей, чтобы затем определить оценки величин и их стандартные отклонения. Аналогично теории погрешностей в концепции неопределенности используются нормальное, прямоугольное, треугольное, трапецидальное и другие распределения.

Нормальное распределение применяют в следующих случаях.

Оценка получена из повторных наблюдений случайно изменяющегося процесса:

$$u(x) = s \text{ (СКО).}$$

Неопределенность дана в форме стандартного отклонения наблюдений:

$$u(x) = s \text{ (СКО).}$$

Неопределенность дается в форме 95%-ого или другого интервала доверия ε без указания вида распределения:

$$u(x) = \varepsilon / 2 \text{ (для } \varepsilon \text{ при } 95 \%).$$

Прямоугольное распределение применяют в следующих случаях.

Об измеряемой величине только известно, что ее значение наверняка лежит в определенной области (от $-a$ до $+a$).

Сертификат или другой документ дает пределы без определения уровня доверия (например, $25 \text{ мл} \pm 0,05 \text{ мл}$, т.е. $a = \pm 0,05 \text{ мл}$);

Оценка получена в форме максимальных значений диапазона ($\pm a$) с неизвестной формой распределения.

Во всех этих случаях стандартная неопределенность определяется как

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}},$$

где $a = (a_- - a_+)/2$.

Треугольное распределение вероятностей применяется в следующих случаях.

Доступная информация относительно измеряемой величины X менее ограничена, чем для прямоугольного распределения.

Оценка получена в форме максимальных значений диапазона ($\pm a$), описанного симметричным распределением.

Когда величина является суммой или разностью двух величин, распределение которых являются прямоугольными с одинаковыми диапазонами.

Во всех этих случаях стандартная неопределенность определяется как

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}},$$

где $a = (a_- - a_+)/2$.

3). Анализ корреляций

Две входные величины могут быть независимы или связаны между собой, то есть взаимозависимы или коррелированы. В концепции неопределенности необходимо логически сделать вывод насколько эффект корреляции должен приниматься в расчет. Это зависит от измерения, от знаний о методе измерения, от оценки взаимных зависимостей входных величин. Например, может существовать значительная корреляция между двумя входными величинами, если при их определении используют один и тот же измерительный прибор, или физический

эталон измерения, или справочные данные, имеющие значительную стандартную неопределенность. Еще один пример, поправка на температуру, необходимая для оценки одной входной величины X_i , получается с помощью термометра и такая же поправка на температуру, необходимая для оценки входной величины X_k , тоже получается с помощью этого же термометра. Тогда две входные величины X_i и X_k могут быть значительно коррелированы.

Мерой взаимной зависимости или корреляции двух случайных переменных X_i и X_k является ковариация. Она должна учитываться при оценивании суммарной стандартной неопределенности среди вкладов неопределенностей входных величин:

$$u(x_i, x_k) = u(x_i)u(x_k)r(x_i, x_k),$$

r - коэффициента корреляции.

Степень корреляции определяется с помощью коэффициента корреляции ($i \neq k$ и $|r| \leq 1$).

Для n пар независимых повторных наблюдений двух величин P и Q ковариация их средних арифметических значений оценивается по формуле

$$u(p, q) = s(\bar{p}, \bar{q}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (p_k - \bar{p})(q_k - \bar{q}).$$

При этом оцененный коэффициент корреляции для p и q получают из первого уравнения

$$r(p, q) = \frac{u(p, q)}{u(p)u(q)}$$

Ковариация, связанная с оценками двух входных величин X_i и X_k , может устанавливаться равной нулю или рассматриваться как пренебрежимо малая, если:

а). Обе входные величины X_i и X_k являются независимыми друг от друга, например, если они в различных, независимых один от другого экспериментах многократно, но не одновременно наблюдались, или если они представляют (описывают) результирующую величину различных, независимых друг от друга проведенных исследований.

б). Если одна из входных величин X_i и X_k может рассматриваться как константа.

в). Если исходя из наших знаний и предположений просто не имеется никаких оснований для существования корреляции между входными величинами X_i и X_k .

4). Составление бюджета неопределенности

Бюджет неопределенности служит для обобщения и наглядного представления всей полученной и проанализированной ранее информации в количественной форме о входных величинах. Цель его составления - облегчить

непосредственный расчет значения стандартной неопределенности, связанной с измеряемой (выходной) величиной.

Таблица 11.2 – Бюджет неопределенности

Величина X_i	Единица измерения	Оценка x_i	Интервал от $-a$ до $+a$	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Степень свободы ν	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенности $u_i(y)$	Процентный вклад, %
X_1		x_1				$u(x_1)$		c_1	$u_1(y)$	
X_2		x_2				$u(x_2)$		c_2	$u_2(y)$	
....										
X_N		x_N				$u(x_N)$		c_N	$u_N(y)$	
Y		y							$u_c(y)$	

5). Расчет значения измеряемой величины

Расчет значения измеряемой или выходной величины Y заключается в нахождении значения ее оценки y . Полученное значение оценки принимается за результат измерения измеряемой величины. Оценку выходной величины получают из уравнения модели, заменяя входные величины X_i их оценками x_i .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N).$$

б). Расчет стандартной неопределенности выходной величины

Стандартная неопределенность выходной величины $u(y)$ представляет собой оцененное стандартное отклонение измеряемой величины. Она характеризует разброс значений, которые могут быть с достаточным основанием приписаны измеряемой величине Y . Она получается суммированием стандартных неопределенностей входных оценок $u(x_i)$, оцененных то типу А или по типу В, и поэтому является суммарной стандартной неопределенностью $u_c(y)$.

Для некоррелированных входных величин:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$$

c_i - называются коэффициентами чувствительности. Это частные производные.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_N}$$

$u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) является вкладом в стандартную неопределенность выходной величины i -ой входной величины X_i .

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$$

Для коррелированных входных величин:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i, x_j)}$$

Приведенные уравнения базируются на аппроксимации функции модели $Y = f(X_1, X_2 \dots X_N)$ рядом Тейлора первого порядка. Коэффициенты чувствительности иногда определяются экспериментальным путем. Стандартная неопределенность $u(x_i)$ всегда положительна. Вклад в неопределенность $u_i(y)$ в зависимости от знака коэффициента чувствительности может принимать положительное или отрицательное значение. В случае некоррелированных величин этот знак не играет роли, так как в этом случае при расчете суммарной стандартной неопределенности вклады в неопределенность $u(x_i)$ возводятся в квадрат. В случае коррелированных входных величин $u(x_i)$ знак обязательно должен приниматься во внимание.

Пример. Для суммы или разности двух коррелированных величин

$$Y = X_1 \pm X_2$$

суммарная стандартная неопределенность равна:

$$u^2(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2) \pm 2u(x_1)u(x_2)r(x_1, x_2)$$

Частные случаи

1. Если функция модели f является суммой или разностью **некоррелированных** входных величин X_i с коэффициентами чувствительности, равными множителям p_i

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i$$

то выражение для расчета стандартной неопределенности выходной величины:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(x_i)}$$

2. Если функция модели f является произведением или отношением некоррелированных входных величин X_i со степенями p_i

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \prod_{i=1}^N X_i^{p_i},$$

то удобнее рассчитывать относительную стандартную неопределенность выходной величины. В этом случае нет необходимости в вычислении коэффициентов чувствительности как частных производных функции математической модели.

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{p_i u(x_i)}{x_i} \right]^2}$$

7). Расчет расширенной неопределенности

Суммарная стандартная неопределенность повсеместно используется для выражения неопределенности измерения. В некоторых случаях, например, когда дело касается здоровья и безопасности, рассчитывают расширенную неопределенность U . Она указывает интервал для результата измерения, в пределах которого находится большая часть распределения значений измеряемой величины. Расширенную неопределенность U получают путем умножения суммарной стандартной неопределенности $u_c(y)$ на коэффициент охвата k :

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

В случае указания расширенной неопределенности результат измерения выражается в виде интервала

$$Y = y \pm U \quad \text{или} \quad (y - U \leq y \leq y + U).$$

Данная запись означает, что наилучшей оценкой измеряемой величины Y является приписываемая величина y . А интервал от $y-U$ до $y+U$ содержит большую часть значений, которые можно приписать Y .

Расширенная стандартная неопределенность не дает никакой новой информации, а просто представляет стандартную неопределенность в новом виде. Значение коэффициента охвата k выбирается на основе уровня доверия p . Для этого необходимо полное знание о распределении вероятностей выходной величины.

В соответствии с положением центральной предельной теоремой, согласно которой всегда, когда случайная величина образуется в результате сложения большого числа независимых случайных величин, дисперсии которых малы по сравнению с дисперсией суммы, закон распределения этой случайной величины оказывается практически нормальным, допускают, что распределение вероятностей, характеризующее результатом измерения и его суммарной стандартной неопределенностью, может считаться нормальным. Тогда для расчета коэффициента охвата k используют значения из таблиц. На практике, а также при проведении калибровок, принимают $k = 2$ для интервала, имеющего уровень

доверия 95% и $k = 3$ для интервала, имеющего уровень доверия 99%. В более ответственных случаях коэффициент охвата определяют по специальным методикам.

Когда распределение вероятностей считается прямоугольным для $p = 95\%$ $k = 1,65$, $p = 99\%$ $k = 1,71$.

Когда выполняется условия центральной предельной теоремы, но не выполняется условие надежности распределение вероятностей результата измерения описывается распределением Стьюдента (t-распределением) с эффективными степенями свободы ν_{eff} .

Оценка эффективных степеней свободы ν_{eff} проводится с помощью формулы Велча-Саттерсвейта:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

где $u_i(y)$ ($i=1, 2, \dots, N$) – вклады в стандартную неопределенность измерения.
 ν_i - эффективная степень свободы вклада в неопределенность $u_i(y)$.

Для значений стандартной неопределенности по типу А $\nu_i = n - 1$

Степени свободы для стандартной неопределенности по типу В могут приниматься $\nu_i \rightarrow \infty$. Коэффициент охвата k определяют из таблицы. Эта таблица базируется на t-распределении, которое установлено для вероятности охвата 95,45% и 99,73%.

Если ν_{eff} является не целым числом, что обычно и происходит, то ν_{eff} уменьшают до ближайшего целого числа.

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k_{95}	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2.00
k_{99}	235.8	19.21	9.22	6.22	5.51	4.90	4.53	4.28	3.96	3.42	3.16	3.00

Для сравнения вкладов источников неопределенности в суммарную стандартную неопределенность используют понятие процентного вклада. Процентный вклад неопределенности i -ой входной величины в суммарную стандартную неопределенность вычисляется как

$$\frac{u_i^2(y)}{u_c^2(y)} 100\%$$

8). Представление конечного результата измерения

Полным является результат измерения, только если он снабжен неопределенностью, приписанной или связанной с этим результатом. При записи численного результата измерения рекомендуется применять следующие способы. В качестве примера рассмотрены способы записи для эталона массы m_s с номинальным значением 100 г.

Если мерой неопределенности измерения является суммарная стандартная неопределенность $u_c(y)$ один из вариантов представления конечного результата измерений следующий:

" $m_s = 100,02147$ г (с суммарной стандартной неопределенностью) $u_c(y) = 0,35$ мг", где число после ";" без указания единиц величин является относительной стандартной неопределенностью $u_c(y)/|y|$.

Если мерой неопределенности измерения является расширенная неопределенность U , то лучше всего указать результат в виде $y \pm U$. При этом наиболее полной будет следующая форма записи:

" $m_s = (100,02147 \pm 0,00079)$ г, где число следующее за знаком \pm , является численным значением расширенной неопределенности $U = ku_c(y)$, причем U определено из суммарной стандартной неопределенности $u_c(y) = 0,35$ мг и коэффициента охвата $k = 2$, основанного на нормальном распределении, и определяет интервал, оцененный как имеющий уровень доверия 95 %".

Более краткой будет следующая запись:

"100,02147 г \pm 0,00079 г ($k = 2, p = 95 \%$)".

Раздел IV. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

12 Методики измерений и требования к ним

12.1 Основные понятия

Методики выполнения измерений (МВИ) как метрологический объект появились в СССР в 70-е годы. Объективными причинами их появления в метрологической деятельности явились сформулированные в то время принципы обеспечения единства измерений, заключающиеся в том, что результаты измерений должны выражаться в узаконенных единицах и должна быть известна погрешность измерений. Для реализации этих принципов был разработан комплекс государственных стандартов под общим обозначением ГОСТ 8.XXX. «Государственная система обеспечения единства измерений», многие из которых актуальны и действуют сегодня. Тогда же в практику стандартизации измерений вошло понятие «методика выполнения измерений», представляющая собой совокупность правил и процедур выполнения измерений, которые обеспечивают получение результатов измерений, точность которых находится в установленных границах с заданной вероятностью. В то время также были сделаны первые шаги по разработке и внедрению процедуры подтверждения пригодности МВИ для измерения конкретной характеристики в конкретном объекте, так называемой «аттестация МВИ». В МВИ содержались основные компоненты системы обеспечения единства измерений: измеряемая величина, единицы величин, метод измерений, метрологические характеристики средств измерений, форма и вид представления результатов измерений и др. За более чем 50 лет со времени появления первых МВИ было разработано большое количество документов разного уровня.

Сегодня, согласно новым международным требованиям, эта процедура называется «**методика (метод) измерений**». Согласно закону «Об обеспечения единства измерений» **методика (метод) измерений** – совокупность описанных операций при измерениях, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности измерений. Методики (методы) измерений (МИ) являются основой обеспечения единства измерений. Правила разработки и применения методик (методов) измерений определено Постановлением Госстандарта РБ № 44.

Особое внимание уделяется методикам (методам) измерений, используемым для контроля качества и безопасности продукции. Их метрологические, технологические и экономические характеристики должны соответствовать современным требованиям и гарантировать достоверность получаемых результатов. Это требует необходимости совершенствования имеющихся МВИ различных характеристик продукции, а в большинстве случаев разработку новых.

12.2 Общие требования к разработке методик (методов) измерений

Разработка МИ включает три основных этапа: теоретические исследования, экспериментальные исследования, оформление и экспертиза документа на МИ.

Теоретические исследования

Исходные данные для разработки МИ, как правило, содержатся в техническом задании (ТЗ) или любом другом документе, разработанном взамен его. В ТЗ на разработку МИ приводится следующая информация:

- назначение методики измерений, т. е. область ее применения, включая перечень объектов и пределы измерений;

- показатели точности измерений;

- характеристики объекта анализа (например, температура жидкости, давление и др.);

- условия измерений (температура, относительная влажность, давление окружающего воздуха, характеристики источника питания средств измерений (СИ), наличие внешних электромагнитных полей, вибрация в местах установки СИ и др.);

- вид индикации и форма регистрации результатов измерений;

- требования к автоматизации измерительных процедур;

- требования к обеспечению безопасности выполнения работ;

- другие требования в соответствии со спецификой МИ.

В дополнение к информации, приведенной в ТЗ, могут потребоваться следующие сведения:

- о наличии СИ, в том числе утвержденных типов;

- о наличии других технических средств, в том числе средств вычислительной техники, которые могут быть использованы при измерениях;

- о наличии эталонов, стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, аттестованных смесей для настройки, поверки (калибровки) СИ, которые могут быть использованы в МИ и для ее метрологического обеспечения;

- о квалификации операторов, выполняющих измерения;

- другие данные в соответствии со спецификой МИ.

Теоретическая разработка МИ включает следующие этапы.

- 1). **Формулировка измерительной задачи.** На основании исходных данных разработчики МИ формулируют измерительную задачу, заключающуюся в определении значения физической величины путем ее измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений. Корректная формулировка измерительной задачи – необходимое условие того, что разработанная МИ будет использована непосредственно по назначению. С этой целью на предварительном этапе систематизируют имеющуюся в различных источниках литературы информацию об анализируемом объекте. При недостаточности или отсутствии некоторых сведений могут проводиться предварительные экспериментальные исследования.

2). Предварительный отбор возможных методов решения измерительной задачи. Выбор метода измерений во многом зависит от измеряемой характеристики. Метод измерений - прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей или соотнесения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений. При этом предпочтительными являются прямые измерения. Однако в силу тех или иных причин в количественном анализе приходится применять и косвенные измерения.

Следует иметь в виду, что при косвенных измерениях обычно имеются отклонения от строгой зависимости измеряемой величины от величин, подвергаемых прямым измерениям. Это обстоятельство приводит к появлению методических составляющих погрешности измерений:

неадекватность (неполное соответствие) модели измерений;

погрешность, вызванная отклонениями при передаче значения измеряемой величины от точки отбора информации до входа средства измерений;

отличие алгоритма вычислений от функции, строго связывающей результаты прямых измерений с измеряемой величиной.

3). Выбор метода и средств измерений. При выборе методов учитывают данные об анализируемом объекте, полученные на предварительном этапе формулирования измерительной задачи. Выбор метода и средств измерений, а также стандартных образцов, аттестованных смесей, вспомогательных и технических средств представляет собой многовариантную задачу. Ее рациональное решение соответствует минимальным затратам на измерения, включая затраты на метрологическое обслуживание средств измерений. Основные процедуры следующие:

предварительно выбирают метод и средства измерений, которые могут быть применены в заданных условиях с учетом имеющихся условий измерений, материальных, технических и человеческих ресурсов;

проводят оценивание точности измерений. В первую очередь учитывают метрологические характеристики выбранных средств измерений (согласно ГОСТ 8.009) – инструментальные и методические погрешности;

оценивают возможность возникновения субъективных погрешностей измерений, определяемых психофизиологическими свойствами оператора, выполняющего измерения.

Затем проводят анализ показателей точности.

Если оцененные показатели точности измерений с применением выбранных метода и средств измерений не превышают допускаемых пределов, то точность измерений считается удовлетворительной.

Если погрешности измерений незначительно меньше предельных значений, то точность измерений считают близкой к оптимальной.

Если оцененные показатели точности измерений существенно меньше допускаемых, то выбранные метод и средства измерений считают нерациональными по экономическим соображениям. В этом случае целесообразно выбрать менее точные метод и средства измерений. При этом проводят новое

оценивание точности измерений. Когда оцененные показатели близки к оптимальным, то выбор метода и средств измерений можно считать законченным.

Если оцененные показатели погрешности измерений превышают пределы допустимых значений, то необходимо выбрать более точный метод и средства измерений и повторно произвести оценивание точности измерений.

Повышение точности измерений возможно как за счет применения более точных средств измерений, так и за счет обработки результатов измерений. Необходимо выявить и оценить показатели доминирующих составляющих точности измерений. Процесс выбора метода и средств измерений заканчивается, когда оцененные показатели точности измерений близки к оптимальным.

4). Установление последовательности и содержания операций при подготовке и выполнении измерений, обработке промежуточных результатов и вычислении окончательных результатов измерений. Все измерения проводятся путем выполнения последовательности операций. Наравне с операциями применения средств измерений имеются и другие, влияющие на точность измерения, например: отбор пробы; доставка пробы в лабораторию; обработка результата измерений. Качество выполнения каждой из этих операций влияет на точность измерения, а ошибка при выполнении любой из них может быть решающей.

Таким образом, в процессе теоретического исследования МИ составляется алгоритм выполнения измерения.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования разработки МИ - проведение лабораторных экспериментов. Цель - апробация (подтверждение) установленного ранее алгоритма выполнения измерений и оценка показателей точности разрабатываемой МИ. Этапы экспериментального исследования.

1). Экспериментальная апробация установленного алгоритма выполнения измерений. Проводится в условиях конкретной лаборатории. При использовании в процессе измерений новых методов и технических средств, проводится дополнительное обучение персонала. В процессе экспериментальной апробации персонал приобретает навыки по выполнению всех операций при подготовке и выполнении измерений, обработке промежуточных результатов и вычислении окончательных результатов измерений.

2). Организация и проведение эксперимента по оценке показателей точности - степени близости результата измерений к принятому опорному значению. Выбор показателей точности, оцениваемых в ходе эксперимента для разрабатываемой МИ, осуществляется в соответствии с требованиями СТБ ИСО 5725-1 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Общие принципы и определения».

Цели стандартов ГОСТ ИСО 5725 – стандартизировать способы оценки точности выполнения измерений различных физических величин. В частности:

а) изложить основные положения, которые следует иметь в виду при оценке точности (правильности и прецизионности) методов и результатов измерений, их применении, а также при экспериментальной оценке различных показателей точности (ГОСТ Р ИСО 5725-1);

b) регламентировать основной метод экспериментальной оценки двух экстремальных показателей прецизионности методов измерений (ГОСТ Р ИСО 5725-2);

c) регламентировать процедуру получения промежуточных показателей прецизионности, изложив условия их применения и методы их оценки (ГОСТ Р ИСО 5725-3);

d) регламентировать основные методы определения правильности метода измерений (ГОСТ Р ИСО 5725-4);

e) регламентировать несколько альтернатив основным методам, приведенным в ГОСТ Р ИСО 5725-2 и ГОСТ Р ИСО 5725-4 для определения прецизионности и правильности методов измерений,

при выполнении измерений в иных заданных условиях (ГОСТ Р ИСО 5725-5);

f) дать представление о некоторых практических применениях показателей правильности и прецизионности (ГОСТ Р ИСО 5725-6).

В документах на МИ, как правило, регламентируются значения таких показателей точности, как правильность и прецизионность.

Правильность - степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений (или результатов испытаний), к принятому опорному значению.

Прецизионность - степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях.

При планировании эксперимента по оценке показателей точности определяют его вид: межлабораторный или внутрилабораторный, и составляют план эксперимента, в котором определяют место проведения эксперимента, ответственных исполнителей, перечень необходимого измерительного оборудования, количество групп наблюдений, которые должны быть получены в условиях воспроизводимости, количество результатов в каждой группе, которые должны быть получены в условиях повторяемости.

Оценочные эксперименты должны быть проведены для всех измеряемых характеристик в рамках области применения МИ как минимум для одного наименования из каждой группы продукции, входящих в область применения МИ. Эксперименты по оценке показателей точности необходимо проводить с применением оборудования и средств измерений, аттестованных или внесенных в реестр Госстандартом РБ или имеющих сертификат калибровки (поверки), выданный уполномоченным органом. Порядок и алгоритм оценивания данных, полученных в ходе эксперимента по оценке показателей точности, выбирается в соответствии с требованиями СТБ ИСО 5725-2 – СТБ ИСО 5725-5.

Таким образом, на экспериментальном этапе разработки МИ уточняется алгоритм выполнения измерения конкретной характеристики. Уточненный алгоритм выполнения измерений представляется в виде проекта МИ, содержащего:

показатели точности МВИ;

требования к средствам измерений, вспомогательным устройствам, материалам, растворам;

условия выполнения измерений;

операции при подготовке к выполнению измерений;
операции при выполнении измерений;
операции обработки и вычислений результатов измерений.

Оформление и экспертиза документа на МИ

Правила проведения всех операций при разработке МИ излагаются в метрологическом документе, называемом документ на методику выполнения измерений. К изложению документа на МИ предъявляются требования, заключающиеся в полном и точном изложении всех операций, выполняемых при подготовке и выполнении измерений, обработке их промежуточных и вычислении окончательных результатов. Должна быть исключена возможность двоякого понимания положений. Полнота изложения информации предполагает наличие всех сведений, необходимых для правильного проведения измерения. Именно неполнота информации в документе на МИ чаще всего приводит к возникновению ошибок в работе оператора и, как следствие, является причиной увеличения погрешностей измерения. Ясность в изложении документа на МИ достигается путем правильного использования терминов и понятий. Построение и содержание документа на МИ должно соответствовать требованиям, приведенным в ГОСТ 8.010. Одновременно с оформлением документа на МИ осуществляют разработку алгоритма оценивания неопределенности и процедур оценки стабильности получаемых результатов измерений (верификации МИ). Разработку алгоритма оценивания неопределенности и ее расчет следует выполнять в соответствии с Руководствами по выражению неопределенности измерений, а также рекомендациями Белорусского государственного института метрологии. При оценивании неопределенности измерения следует учитывать показатели точности, полученные в соответствии с СТБ ИСО 5725-2– СТБ ИСО 5725-5.

Верификация МИ – это процедура подтверждения посредством представления объективных свидетельств того, что установленные в документе на МИ требования выполняются. Процедуры верификации МИ должны проводиться в соответствии с требованиями СТБ ИСО 5725-6. Верификацию МИ необходимо осуществлять с определенной периодичностью, чтобы убедиться, что процесс измерения остается под контролем. Наиболее эффективным способом верификации МИ является использование контрольных карт, которые позволяют оценивать динамику как прецизионности, так и правильности выполняемых измерений.

Заключительным этапом разработки МИ является экспертиза документа на МИ и отчета по экспериментальным исследованиям уполномоченными органами. Документы на МИ подлежат метрологическому подтверждению пригодности МИ. Цель - определить ее соответствия метрологическим требованиям, установленным в соответствующих ТНПА. При проведении метрологического подтверждения пригодности определяется соответствие области применения МИ требованиям, предъявляемым к измерениям, проводимым с применением этих методик. Данная процедура проводится БелГИМ либо ЦСМС. Правила проведения работ установлены в ТКП 8.006 «Система обеспечения единства измерений Республики

Беларусь. Метрологическое подтверждение пригодности методик выполнения измерений. Правила проведения работ».

12.3 Разработка и структура МВИ согласно требованиям ГОСТ 8.010

Стандарт устанавливает общие положения и требования, относящиеся к разработке, стандартизации методик выполнения измерений и метрологическому надзору (контролю) за ними. В сфере законодательной метрологии применяют только аттестованные методики выполнения измерений. Стандарт не распространяется на методики, предназначенные для выполнения измерений методом непосредственной оценки, т. е. методики, в соответствии с которыми искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений. Показатели точности результатов измерений, полученных методом непосредственной оценки, полностью определяются показателями точности средств и условиями проведения измерений. Стандарт предполагает следующие этапы разработки МВИ.

1). Разработка МВИ. Исходными данными являются (могут быть приведены в ТЗ, ТУ и других документах):

область применения (объект измерений, в том числе наименование продукции и контролируемых параметров, а также область использования - для одного предприятия, для сети лабораторий и т. п.);

наименование ТР, номер пункта (при необходимости и наименования межгосударственного или национального стандарта или свода правил);

наименование измеряемых(ой) величин(ы) в единицах величин, допущенных к применению в данной стране;

требования к показателям точности измерений;

требования к условиям выполнения измерений;

характеристики объекта измерений, если они могут влиять на точность измерений (выходное сопротивление, жесткость в месте контакта датчиком, состав пробы и т. п.);

при необходимости - другие требования к методикам выполнения измерений, например требования к применяемым средствам измерений.

Требования к точности измерений приводят путем задания показателей точности и ссылки на документы. Если требования к показателям точности не определены, то требования к показателям точности должны основываться на заданном допуске на измеряемую величину, при его наличии.

Условия измерений задают в виде номинальных значений с допускаемыми отклонениями и (или) границ диапазонов возможных значений влияющих величин. При необходимости указывают другие характеристики влияющих величин. Если измерения предполагается выполнять с использованием измерительных систем, для которых средства измерений, входящие в состав измерительных каналов, пространственно удалены друг от друга, то условия измерений указывают для мест расположения всех средств измерений, входящих в измерительную систему.

Разработка МВИ предполагает:

формулирование измерительной задачи и описание измеряемых величин;
предварительный отбор возможных методов решения измерительной задачи;
выбор метода и средств измерений (в том числе стандартных образцов),
вспомогательных устройств, материалов и реактивов;

установление последовательности и содержания операций при подготовке и выполнении измерений, включая требования по обеспечению безопасности труда и экологической безопасности и требования к квалификации операторов;

организацию и проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке показателей точности разработанной МВИ; экспериментальное опробование методик выполнения измерений; анализ соответствия показателей точности исходным требованиям;

обработку промежуточных результатов измерений и вычисление окончательных результатов, полученных с помощью данной методики выполнения измерений;

разработку процедур и установление нормативов контроля точности, получаемых результатов измерений;

разработку проекта документа на МВИ;

аттестацию МВИ;

утверждение и регистрацию документа на МВИ, оформление свидетельства об аттестации;

регистрацию МВИ в национальном реестре в порядке, установленном национальным законодательством.

В документе, регламентирующем методику выполнения измерений, указывают:

наименование МВИ;

назначение МВИ;

область применения;

условия выполнения измерений;

метод (методы) измерений;

допускаемую и (или) приписанную неопределенность измерений или норму погрешности и (или) приписанные характеристики погрешности измерений;

применяемые средства измерений, стандартные образцы, их метрологические характеристики;

операции при подготовке к выполнению измерений, в том числе по отбору проб;

операции при выполнении измерений;

операции обработки результатов измерений;

требования к оформлению результатов измерений;

процедуры и периодичность контроля точности получаемых результатов измерений;

требования к квалификации операторов;

требования к обеспечению безопасности выполняемых работ;

требования к обеспечению экологической безопасности;

другие требования и операции (при необходимости).

2). Стандартизация МВИ. Межгосударственные, национальные стандарты и другие документы в области стандартизации должны содержать только аттестованные МВИ, для которых показатели точности результатов измерений проверены и подтверждены в установленном порядке. Разработку стандартов, в которых излагают методики выполнения измерений, выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 1.5 («Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации») и разделов 5 и 6 настоящего стандарта. Показатели воспроизводимости измерений устанавливаются в стандартах на основе результатов межлабораторных экспериментов, проведенных в соответствии со стандартами ГОСТ ИСО 5725-2, -3, -5. Пояснительная записка к комплексу документов, представляемых для утверждения стандарта, в котором регламентированы МВИ, должна содержать выводы по результатам проведенных исследований при аттестации МВИ.

3). Метрологический надзор за аттестованными МВИ. Государственный метрологический надзор осуществляется за наличием и соблюдением аттестованных МВИ, применяемых в сфере законодательной метрологии. Метрологические службы юридических лиц и индивидуальные предприниматели осуществляют метрологический надзор за наличием и соблюдением аттестованных МВИ, применяемых при реализации своей деятельности. При проведении метрологического надзора проверяют:

наличие перечня всех МВИ, применяемых юридическим лицом или индивидуальным предпринимателем при реализации своей деятельности, в том числе стандартизованных, с выделением МВИ, применяемых в сфере законодательной метрологии;

наличие документов, регламентирующих МВИ, с копиями свидетельств об аттестации (в соответствии с перечнем);

соответствие применяемых средств измерений и других технических средств, условий измерений, порядка подготовки и выполнения измерений, обработки и оформления результатов измерений указанным в документе, регламентирующем МВИ;

соблюдение требований к процедуре контроля показателей точности результатов измерений по МВИ;

соответствие квалификации операторов, выполняющих измерения, требованиям, установленным в документе на МВИ;

соблюдение требований по обеспечению безопасности труда и экологической безопасности, регламентированных МВИ.

Структура документа на МВИ. Документ на МВИ включает следующие структурные элементы:

титульный лист;

вводную часть;

метод измерений;

показатели точности МВИ;

требования к средствам измерений, вспомогательным устройствам, материалам, растворам;
условия выполнения измерений;
требования к обеспечению безопасности выполняемых работ;
требования к обеспечению экологической безопасности;
требования к квалификации операторов;
операции при подготовке к выполнению измерений;
операции при выполнении измерений;
операции обработки и вычислений результатов измерений;
алгоритм оценивания неопределенности измерения;
контроль приемлемости результатов, полученных в условиях воспроизводимости;
контроль лабораторного смещения;
контроль стабильности результатов измерений в лаборатории*;
требования к оформлению результатов измерений;
приложение.

13 Эталоны единиц величин

13.1 Общие сведения

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых должны быть проградуированы все существующие средства измерений одной и той же физической величины. Это достигается с помощью эталонов. Эталоны точно воспроизводят и хранят установленные единицы физических величин. Они находятся в специализированных учреждениях и передают размеры единиц физических величин средствам измерений. Классификация, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ 8.057 – 80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения».

Эталон единицы величины – техническое средство (средство измерений, комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы величины.

Единица величины – величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное 1, определяемая и принимаемая по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин.

Воспроизведением единицы физической величины называют совокупность операций по материализации единицы величины с помощью первичного эталона. Воспроизведение основной единицы осуществляют путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии с определением единицы.

Согласно Закону РБ «Об обеспечении единства измерений»:

1) эталоны единиц величин служат основой для установления значений единиц величин, воспроизводимых и (или) хранимых другими эталонами единиц величин, а также для установления и (или) подтверждения метрологических характеристик средств измерений при поверке и (или) калибровке;

2) эталоны единиц величин должны обеспечивать метрологическую прослеживаемость результатов измерений до единиц величин, воспроизводимых национальными эталонами единиц величин, международными эталонами единиц величин или национальными эталонами единиц величин иностранных государств;

3) эталоны единиц величин подлежат сличению эталонов единиц величин либо поверке или калибровке.

Эталон должен обладать взаимосвязанными свойствами: воспроизводимостью, неизменностью и сличаемостью.

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается постоянным исследованием эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Неизменность – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени. При этом

все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями и доступны точному измерению.

Сличаемость - возможность сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличения.

Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных. Например, создание современного международного эталона метра.

С целью выбора единицы измерения, для которой мог бы существовать эталон метра, не изменяющийся во времени, за метр была принята величина, равная одной десятиллионной ($1/10000000$, т.е. $1 \cdot 10^{-7}$) части от $1/4$ части земного меридиана, на котором расположен Париж. Само слово метр является французским словом *metre* (от греч. *metron* – мера). Размер метра был определен на основе геодезических и астрономических измерений. Был изготовлен первый эталон в виде платиновой линейки шириной около 25 мм и толщиной около 4 мм с расстоянием между концами в 1 метр. Изготовленный метр был передан на хранение в архив Франции, где находится до сих пор, и его называют «метр Архива», или «Архивный метр». В 1837 г. французские ученые установили, что в четверти меридиана содержится не 10 млн., а 10 млн. 856 м. Кроме того, примерно в тот же период времени стало очевидным, что форма и размеры Земли со временем изменяются, хоть и незначительно. Тем не менее, в 1872 г. было решено за метр принять длину архивного метра. По нему были изготовлены 31 копия в виде платино-иридиевых брусков, имеющих в поперечном сечении форму буквы X, как бы вписанную в воображаемый квадрат, сторона которого равна 20 мм. Такая форма бруска обеспечивала прочность от изгиба во всех направлениях. Вблизи каждого конца были нанесены по три штриха, и расстояние между средними штрихами было равно одному метру при температуре 0°C . Эталон № 6 оказался при 0°C точно равным длине метра Архива и был принят в 1889 г. I-ой Генеральной конференцией по мерам и весам в качестве международного прототипа метра. Остальные эталоны были распределены между различными странами. Эталон метра № 28 достался России, который впоследствии был утвержден в качестве государственного эталона СССР. Требования к повышению точности эталона длины (погрешность платино-иридиевого прототипа метра составляла $\pm 1,1 \cdot 10^{-7}\text{м}$), а также целесообразность установления естественного и неразрушимого эталона привели к тому, что в 1960 г. за метр была принята длина, равная $1\,650\,763,73$ длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $2d_5$ атома криптона-86 (криптоновый метр). Эталон для воспроизведения метра по принятому определению состоял из источника излучения, представлявшего собой газоразрядную лампу с изотопом криптона-86, эталонного интерферометра с фотоэлектрическим микроскопом и рефрактором, эталонного спектроинтерферометра. Погрешность воспроизведения метра, оцениваемая

средним квадратическим отклонением результата измерения с помощью данного эталона существенно, уменьшилась по сравнению с погрешностью платино-иридиевого прототипа метра и составила $5 \cdot 10^{-9}$ м. Место хранения эталона – ВНИИМ им. Д.М. Менделеева. Дальнейшие исследования позволили создать более точный эталон метра, основанный на длине волны в вакууме моно-хроматического излучения, генерируемого стабилизированным лазером. Современное определение метра в терминах времени и скорости света было принято XVII Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в 1983 году.

Метр - длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458$ секунды. Точность эталона составляет 4 нм.

[Изменения определений основных единиц СИ 2018-2019 годов](#) не затронуло метр с содержательной точки зрения.

Аналогичный пример эволюции эталонов можно привести для международного эталона килограмма. Единица массы (1 кг «точно») воспроизведилась в виде международного эталона килограмма – гири, хранимой в Международном бюро мер и весов (МБМВ). Эталон представлял собой цилиндр диаметром и высотой 39,17 мм из платино-иридиевого сплава (90 % платины, 10 % иридия). Подобные гири были розданы другим странам и имели то же номинальное значение 1 кг. Их действительные значения оценивались по отношению к международному эталону. На основании последних для СССР международных сличений (1979 г.) платино-иридиевая гиря, входящая в состав Государственного эталона единицы массы имела значение 1,000000087 кг. Однако у учёных накопились претензии к международному эталону килограмма. Несмотря на принятые строгие условия хранения и меры предосторожности, за прошедшее время после изготовления цилиндра-эталона, его вес изменился на 50 микрограмм. Сегодня международный эталон килограмма устанавливается фиксацией численного значения постоянной Планка. Он определяется не весом кусочка сплава, а количеством электрической энергии, которое необходимо, чтобы сдвинуть с места объект весом в 1 килограмм. Эта энергия, в свою очередь, будет рассчитываться на основе постоянной Планка. Неопределённость измерения постоянной Планка не превышает 50×10^{-9} .

Кроме перечисленных к эталонам предъявляют и другие требования: особо высокая точность воспроизведения единицы, воспроизведение единицы в форме, удобной для передачи другому средству измерений и для сопоставления с другим эталоном, стабильность хранения единицы в течение длительного времени, «неуничтожимость». Последнее требование не имеет столь абсолютного характера как предыдущие, что подтверждает пример международного эталона килограмма.

13.2 Виды эталонов

По метрологическому назначению эталоны делятся на первичные, вторичные и рабочие.

Первичный эталон – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью (по сравнению с другими эталонами той же единицы). Наряду с термином «первичный эталон» применяют понятие исходный эталон – эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в системе субъекта хозяйствования, объединения, в стране). От него передают размер единицы подчиненным эталонам и другим средствам измерений. Исходным эталоном для субъекта хозяйствования или объединения субъектов может быть вторичный или рабочий эталон, а также иное эталонное средство измерений. Исходным эталоном в стране, как правило, является первичный эталон. Эталон, признанный в установленном порядке исходным для страны, называют национальным или государственным первичным эталоном (государственным эталоном). Термин «национальный эталон» обычно применяют при сличении эталонов разных стран, или эталона некоторого государства с международным эталоном. Государственные эталоны обычно хранятся в организациях Госстандарта (БелГИМ). Согласно закону «Об обеспечении единства измерений» национальный эталон единицы величины – эталон единицы величины, утвержденный Госстандартом и предназначенный для использования в качестве основы для приписывания значения величины другим эталонам единиц величин того же рода. Статья 14 закона определяет.

1. Национальные эталоны единиц величин создаются для воспроизведения, хранения и передачи единиц величин и обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений до единиц величин Международной системы единиц (СИ).

2. Национальные эталоны единиц величин образуют эталонную базу Республики Беларусь.

3. Национальные эталоны единиц величин находятся только в собственности государства.

4. Для установления и (или) подтверждения метрологических характеристик проводится сличение национальных эталонов единиц величин с международными эталонами единиц величин или национальными эталонами единиц величин иностранных государств равнозначной точности. В случае, когда международный эталон единицы величины или национальный эталон единицы величины иностранного государства превышают по точности национальный эталон единицы величины, вместо сличения эталонов единиц величин могут осуществляться поверка и (или) калибровка национального эталона единицы величины.

5. Разработка и модернизация национальных эталонов единиц величин осуществляются в соответствии с государственными научно-техническими программами.

6. При разработке и модернизации национального эталона единицы величины должна обеспечиваться защита от несанкционированного вмешательства в его конструкцию и программное обеспечение для предотвращения намеренного искажения единицы величины, воспроизводимой, хранимой и передаваемой национальным эталоном единицы величины.

7. Национальные эталоны единиц величин регистрируются в Государственном реестре национальных эталонов единиц величин Республики Беларусь.

Международный эталон – эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами. Международные эталоны единиц физических величин хранятся в Международном бюро мер и весов (МБМВ).

Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров. Они создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. Кроме того, они могут использоваться при сопоставлении с международными и другими национальными эталонами.

Вторичный эталон – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы. Вторичные эталоны подразделяются на эталоны-копии, эталоны-свидетели и эталоны сравнения.

Эталон-копия предназначен для передачи размера единицы физической величины рабочим эталонам. Он представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он не всегда является его физической копией.

Эталон-свидетель предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного первичного эталона и замены его в случае порчи или утраты.

Эталон сравнения применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом. Например, из-за нетранспортабельности эталонной установки (первичного эталона).

Существует также понятие «специальный эталон». Он разрабатывается в случае необходимости воспроизведения единицы в особых условиях. В метрологической литературе специальные эталоны относят к первичным эталонам.

Рабочий эталон – вторичный эталон, применяемый для передачи размера единицы от эталона-копии эталонным средствам измерений высшей точности и при необходимости наиболее точным рабочим средствам измерений. Термин «рабочий эталон» с введением РМГ 29 распространяется не только на собственно вторичный эталон, он должен также заменить ранее использовавшийся термин «образцовое средство измерений». Цель замены – упорядочение терминологии для сближения ее с международной. Передачу размера единицы эталонным (образцовым) и рабочим средствам измерений осуществляют через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов.

13.3 Соподчиненность эталонов

Теоретически для воспроизведения всех единиц некоторой системы единиц ФВ достаточно воспроизвести с помощью эталонов только основные единицы этой системы. Однако фактически широко используют как эталоны для

воспроизведения основных единиц физических величин системы, так и эталоны для воспроизведения ряда производных единиц, например, эталоны единиц электрических величин: ЭДС, сопротивления, емкости, индуктивности и др. При создании эталонов производных единиц обеспечивается их связь с эталонами основных единиц. Эталоны производных единиц в ряде случаев обеспечивают повышение точности, с которой размеры этих единиц воспроизводятся и передаются нижестоящим средствам измерений, по сравнению с точностью косвенного воспроизведения тех же единиц через основные.

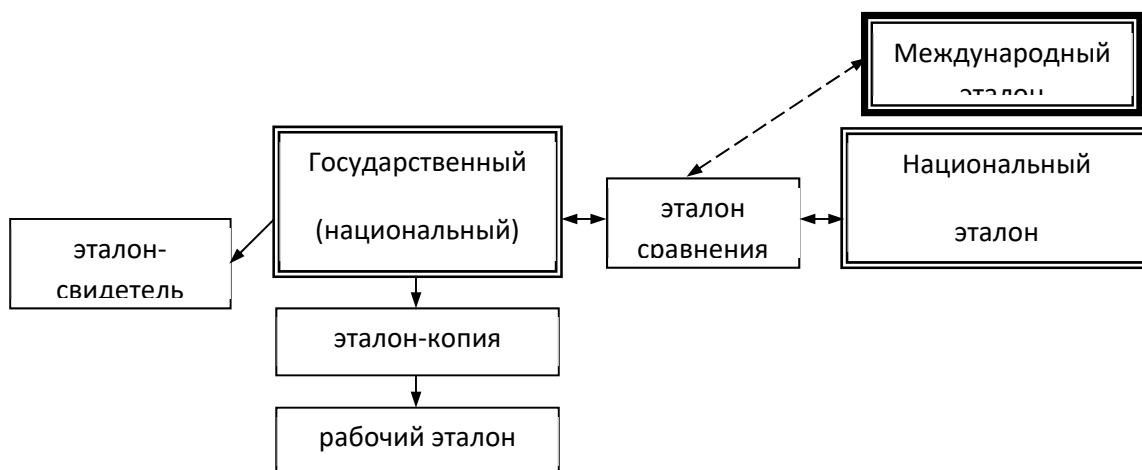


Рисунок 13.1 — Схема соподчиненности эталонов

Совокупность государственных первичных и вторичных эталонов, составляют эталонную базу страны. Число эталонов, входящих в эталонную базу, изменяется в зависимости от потребностей промышленности, научных и технологических возможностей. Обычно число эталонов со временем увеличивается, что связано с постоянным развитием средств измерений. Воспроизведение основных единиц Международной системы (SI) должно осуществляться с помощью государственных эталонов. Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Для воспроизведения эталонных значений физической величины изготавливают и применяют одиночные и групповые эталоны, а также эталонные наборы. Если воспроизведение величины для всего необходимого диапазона одним первичным эталоном технически нецелесообразно, создают несколько первичных эталонов, охватывающих части диапазона с тем, чтобы в итоге был охвачен весь диапазон.

Одиночный эталон – эталон, в составе которого имеется одно средство измерений (мера, измерительный прибор, эталонная установка) для воспроизведения и (или) хранения единицы.

Групповой эталон – эталон, в состав которого входит совокупность средств измерений одного типа, номинального значения или диапазона измерений,

применяемых совместно для повышения точности воспроизведения единицы или ее хранения.

Эталонный набор – эталон, состоящий из совокупности средств измерений, позволяющих воспроизводить и (или) хранить единицу в диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств. Эталонные наборы создаются в тех случаях, когда необходимо охватить определенную область значений ФВ (например, эталонные разновесы - наборы эталонных гирь). При необходимости создают также эталонные установки – измерительные установки, входящие в состав эталона. Он может включать несколько эталонных установок (например, в состав российского государственного первичного эталона единицы активности радионуклидов входит шесть эталонных установок).

Хранение эталона - выполнение совокупности операций, необходимых для поддержания метрологических характеристик эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняют исследования, включая оценку стабильности размера и сличение его с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера. Для хранения государственных эталонов устанавливается специальная категория должностных лиц – ученых хранителей государственных эталонов, назначаемых из числа ведущих в данной области специалистов-метрологов. Ученый хранитель государственного эталона – должностное лицо государственного научного метрологического центра, несущее ответственность за правильное хранение и применение государственного эталона и его совершенствование.

Ключевой задачей Госстандарта и Национального метрологического института (БелГИМ) является развитие и совершенствование национальной эталонной базы. Сегодня в Беларуси функционируют 65 эталонов наивысшей точности. Их международный уровень подтверждается путем сличения с эталонами других стран. Среди новых эталонов - эталон единицы скорости воздушного потока. «Этот эталон крайне важен. Он используется при контроле воздухообмена, скорости движения воздуха в системе вентиляции. Сейчас это актуально как никогда, так как вопрос свежего воздуха необходим для сохранения жизни и здоровья людей». Материально-техническая база БелГИМ включает 22 эталонные установки высшей точности и тысячи единиц испытательного оборудования. Правительством утверждена ГНТП «Национальные эталоны Беларуси и высокотехнологичное исследовательское оборудование» на 2021–2025 годы. «За это время планируется разработать девять эталонов и модернизировать десять. Всего к окончанию пятилетки в Беларуси будет 74 национальных эталона».

14 Метрологическая оценка

14.1 Понятие метрологической оценки

Согласно Закону «Об обеспечении единства измерений» **метрологическая оценка** – совокупность работ, проводимых в целях обеспечения единства измерений. Следует отметить, что в более ранних метрологических документах аналогичная деятельность называлась метрологическим контролем. Основными целями метрологической оценки являются:

установление и (или) подтверждение метрологических, а также технических характеристик эталонов единиц величин, средств измерений и стандартных образцов;

определение соответствия средств измерений, стандартных образцов метрологическим требованиям;

определение соответствия методик (методов) измерений метрологическим требованиям, а также их назначению.

Основные мероприятия метрологической оценки:

утверждение типа СИ, СО;

поверка;

калибровка;

метрологическая экспертиза;

аттестация методик (методов) измерений;

сличение результатов измерений.

Рассмотрим подробнее операции поверки и калибровки.

Поверка средства измерений – проведение работ по метрологической оценке, в ходе которых подтверждается соответствие средства измерений обязательным метрологическим требованиям. При поверке официально уполномоченным органом устанавливается пригодность средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям. Поверку могут осуществлять юридические лица и индивидуальные предприниматели в отношении средств измерений применяемых при измерениях вне сферы законодательной метрологии. При этом выполнение работ по поверке непосредственно осуществляют поверители. Поверитель - работник юридического лица или индивидуального предпринимателя, который назначен этими юридическим лицом или индивидуальным предпринимателем для осуществления поверки средства измерений, или индивидуальный предприниматель, имеющие необходимую квалификацию в области обеспечения единства измерений

Законом «Об обеспечении единства измерений» определяется также понятие государственной поверки средства измерений, предназначенного для применения при измерениях в сфере законодательной метрологии - это поверка, осуществляемая уполномоченным юридическим лицом или иным

юридическим лицом Республики Беларусь, уполномоченным Государственным комитетом по стандартизации на осуществление государственной поверки. Эту поверку могут осуществлять уполномоченные юридические лица из числа юридических лиц, аккредитованных в соответствии с правилами аккредитации на поверку. При этом выполнение работ по государственной поверке непосредственно осуществляют государственные поверители. Государственный поверитель - работник уполномоченного юридического лица или иного юридического лица, уполномоченного Госстандартом на осуществление государственной поверки, компетентность которого в осуществлении государственной поверки удостоверена путем обязательного подтверждения соответствия компетентности персонала в проведении определенных работ и который назначен этими юридическими лицами для осуществления государственной поверки.

Государственная поверка может быть первичной или последующей. Первичная государственная поверка проводится до реализации средств измерений утвержденного типа и после ремонта таких средств измерений, произведенных в период срока действия сертификата об утверждении типа средства измерений. Последующей государственной поверке подлежат средства измерений, находящиеся в эксплуатации, с учетом межповерочного интервала, установленного с учетом срока действия государственной поверки.

Основными методами поверки являются:

непосредственное сличение (сличение показаний поверяемого и эталонного СИ);

сличение с помощью компаратора (сравнивают рабочие меры массы с эталонными, взвешивая их на эталонных весах);

метод прямых измерений;

метод косвенных измерений.

Непосредственное сличение чаще всего используется при поверке измерительных приборов. Метод основан на одновременном измерении поверяемым и эталонным СИ одной и той же величины X (рис.14.1). Измерения проводят на всём диапазоне изменений ФВ. По разности показаний Δ поверяемого X_n и эталонного X_s СИ делается вывод о годности поверяемого СИ.

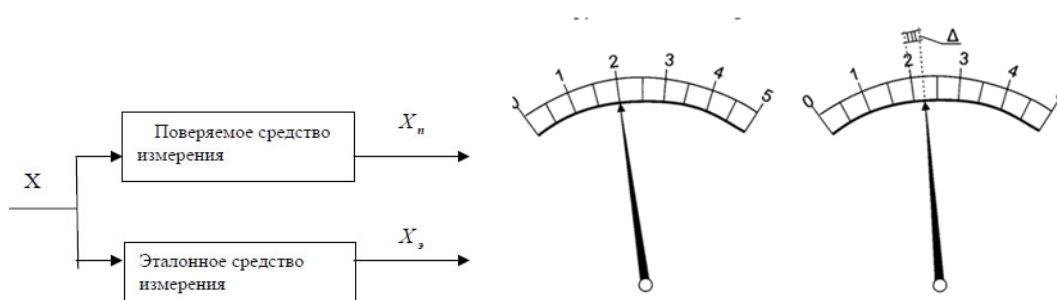


Рисунок 14.1 – Метод непосредственного сличения

Важным при поверке является выбор соотношения между допускаемыми погрешностями эталонного и поверяемого СИ. Если при поверке вводят поправки на показания эталонных СИ, то соотношение принимается равным 1:3 (исходя из критерия ничтожно малой погрешности). Если поправки не вводят, то эталонные СИ выбираются из соотношения 1:5.

Сличение с помощью компаратора является основным методом поверки мер и осуществляется методами противопоставления или замещения. Общим для этих разновидностей поверки является выработка сигнала компаратором о наличии разности поверяемых величин. Компаратором может быть СИ. В качестве примера на рис.14.2 показаны реализации метода противопоставления (рис а) и замещения (рис.б) с использованием моста постоянного тока.

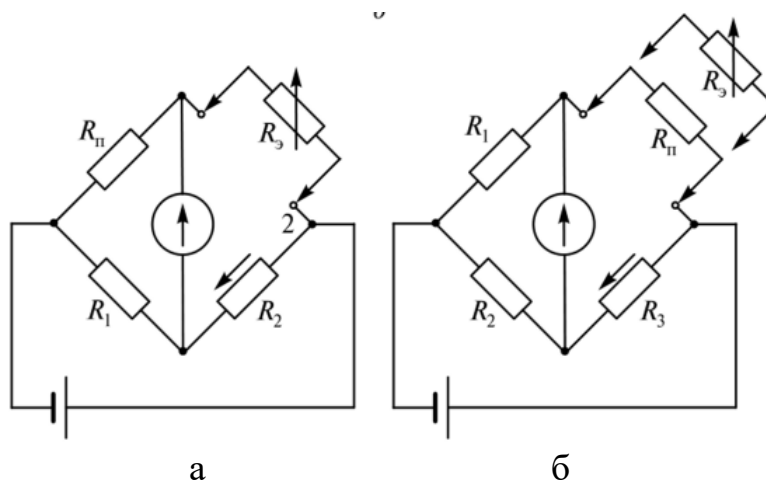


Рисунок 14.2 — Реализация метода противопоставления и замещения с использованием моста постоянного тока

При противопоставлении регулируют эталонную меру R_3 пока не наступит баланс моста: $R_n R_2 = R_3 R_1$. При балансе ток в диагонали будет равен нулю. Разность показаний поверяемой меры R_n и эталонной R_3 служит результатом поверки.

При замещении вначале к мосту подключают поверяемую меру R_n и фиксируют ток в диагонали моста. Затем вместо поверяемой меры R_n подключают эталонную R_3 . Регулируя значение эталонной меры добиваются тех же показаний тока в диагонали. Затем определяют разность показаний поверяемой меры R_n и эталонной R_3 , которая служит результатом поверки.

Метод прямых измерений применяется для поверки как мер, так и измерительных приборов. Метод основан на прямых измерениях ФВ, воспроизводимой эталонной мерой. Разность показаний поверяемого СИ и эталонной меры служит результатом поверки.

Метод косвенных измерений применяют когда при поверке измерительного прибора измеряемая им величина не может воспроизведена с заданной точностью. Например, поверка амперметра путём измерения

падения напряжения эталонным вольтметром на эталонном резисторе. Воспроизводимое значение тока определяют по закону Ома.

14.2 Поверочные схемы

Единицу физической величины, воспроизведенную эталоном, необходимо передать всем рабочим средствам измерений данной физической величины. Передача размера единицы – приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым СИ, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном. Передачу единицы другим средствам измерений осуществляют в ходе поверки или калибровки. При поверке, в зависимости от метода, одну и ту же ФВ измеряют поверяемым средством измерения и эталоном. Порядок передачи размера единицы в ходе поверки устанавливает специальный документ – поверочная схема, а процедуру фиксируют в методике поверки.

Поверочная схема – нормативный документ, устанавливающий соподчинение СИ, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим СИ (с указанием методов и погрешности при передаче). В поверочных схемах указывают применяемые СИ и метод поверки. В соответствии с поверочной схемой единицу передают «сверху вниз» от исходного эталона другим эталонам, а затем эталонным или рабочим средствам измерений, расположенным в поверочной схеме на ступень ниже. Элементами поверочной схемы являются наличие государственного эталона, эталонов-копий, эталонов-свидетелей, рабочих эталонов, эталонных средств измерения и рабочих средств измерения, а также методов передачи размеров. Поверочная схема может включать графическую и текстовую части. Если нет необходимости в больших по объему пояснениях, эти две части могут быть объединены (текст представляют на графической части схемы).

Пример структуры графической части поверочной схемы представлена на рисунке (14.3). Схема выполняется как инструкция. В чертеже указывается наименование СИ, диапазоны значений физических величин, обозначение и оценка погрешности, наименование метода поверки. В прямоугольных рамках указаны СИ, а в овальных - методы поверки. Число иерархических ступеней поверочной схемы определяют в соответствии с уровнями точности применяемых рабочих средств измерений. Чем более разнообразны требования к их точности, тем больше необходимо разрядов эталонных средств измерений.

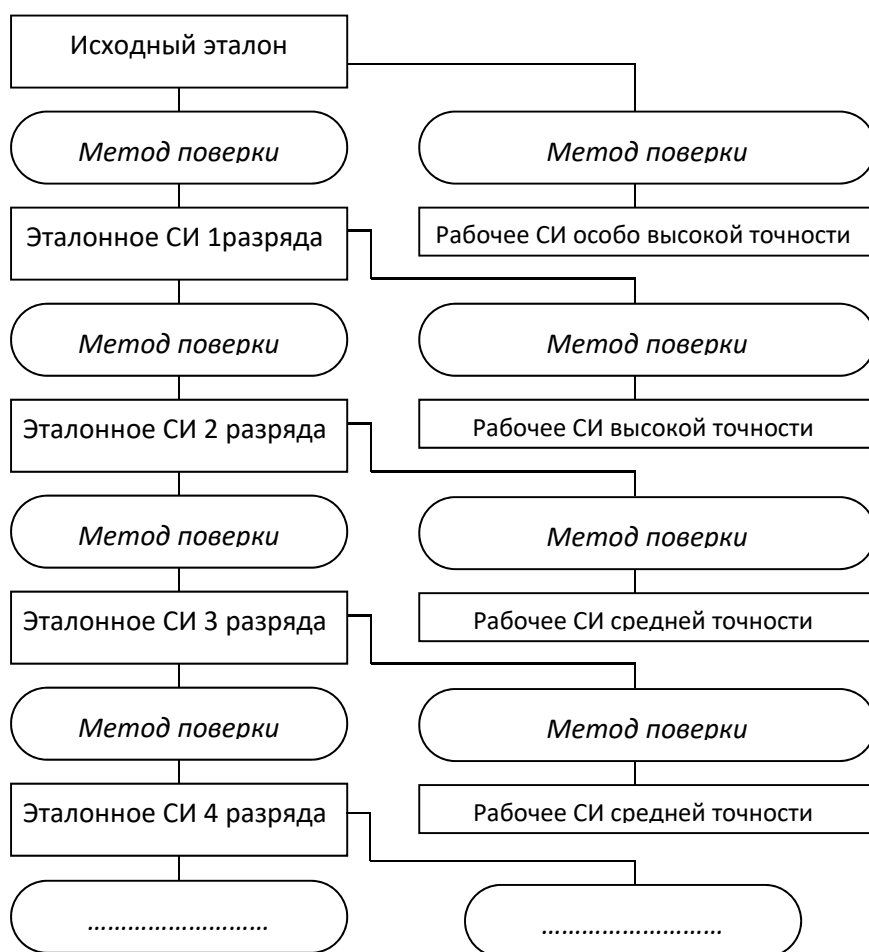


Рисунок 14.3 — Общая структура поверочной схемы

Так как рабочие СИ выпускают различных уровней точности, то для их поверки применяются вторичные эталоны, в том числе рабочие эталоны первого и более низких разрядов (эталонные средства измерений). В результате прецизионные рабочие средства измерений по точности могут превосходить эталонные средства измерений высоких разрядов, предназначенные для поверки менее точных средств измерений. Принципиальные различия между эталонными и рабочими средствами измерений заключаются не в точности, а в том, что эталоны официально утверждены в качестве таковых и должны использоваться только для поверки, в то время как рабочие СИ предназначены только для измерений, не связанных с передачей единицы другим СИ при их поверке. Следует отметить, что в более ранних метрологических документах эталонные СИ называли «образцовыми СИ». Это наименование и сейчас содержится в значительной части стандартов на поверочные схемы и поверку.

Содержание поверочных схем и требования к их построению определены в стандарте ГОСТ 8.061 – 80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и

построение». Согласно этому стандарту поверочные схемы подразделяются на государственные, локальные и ведомственные.

Государственная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на все средства измерений данной физической величины, имеющиеся в стране.

Локальная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на средства измерений данной физической величины, применяемые в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (в организации).

В качестве примера на рис 14.4 показана государственная поверочная схема для средств измерений pH, а на рис.14.5 приведена локальная поверочная схема частотомера.

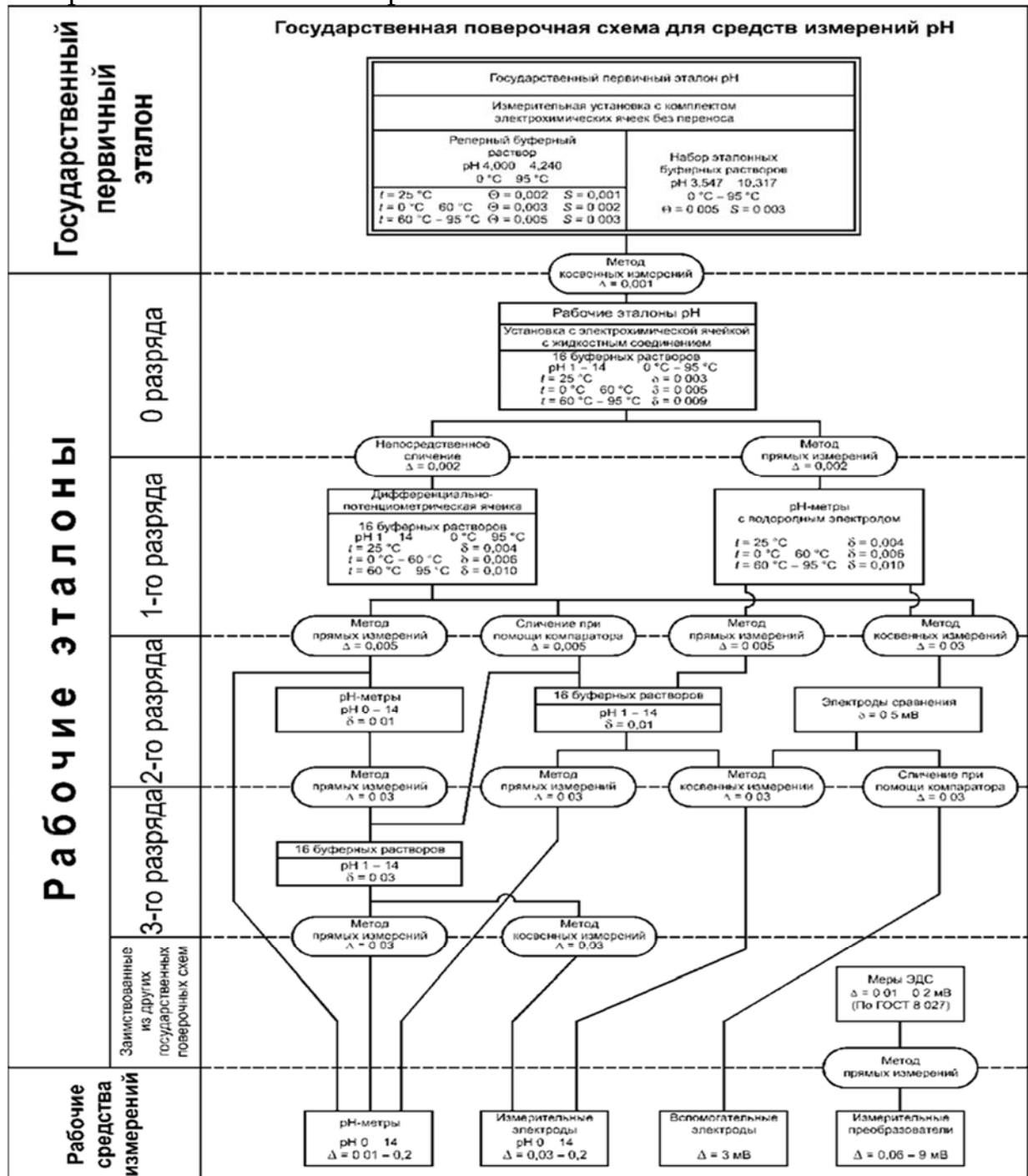


Рисунок 14.4 – Государственная поверочная схема

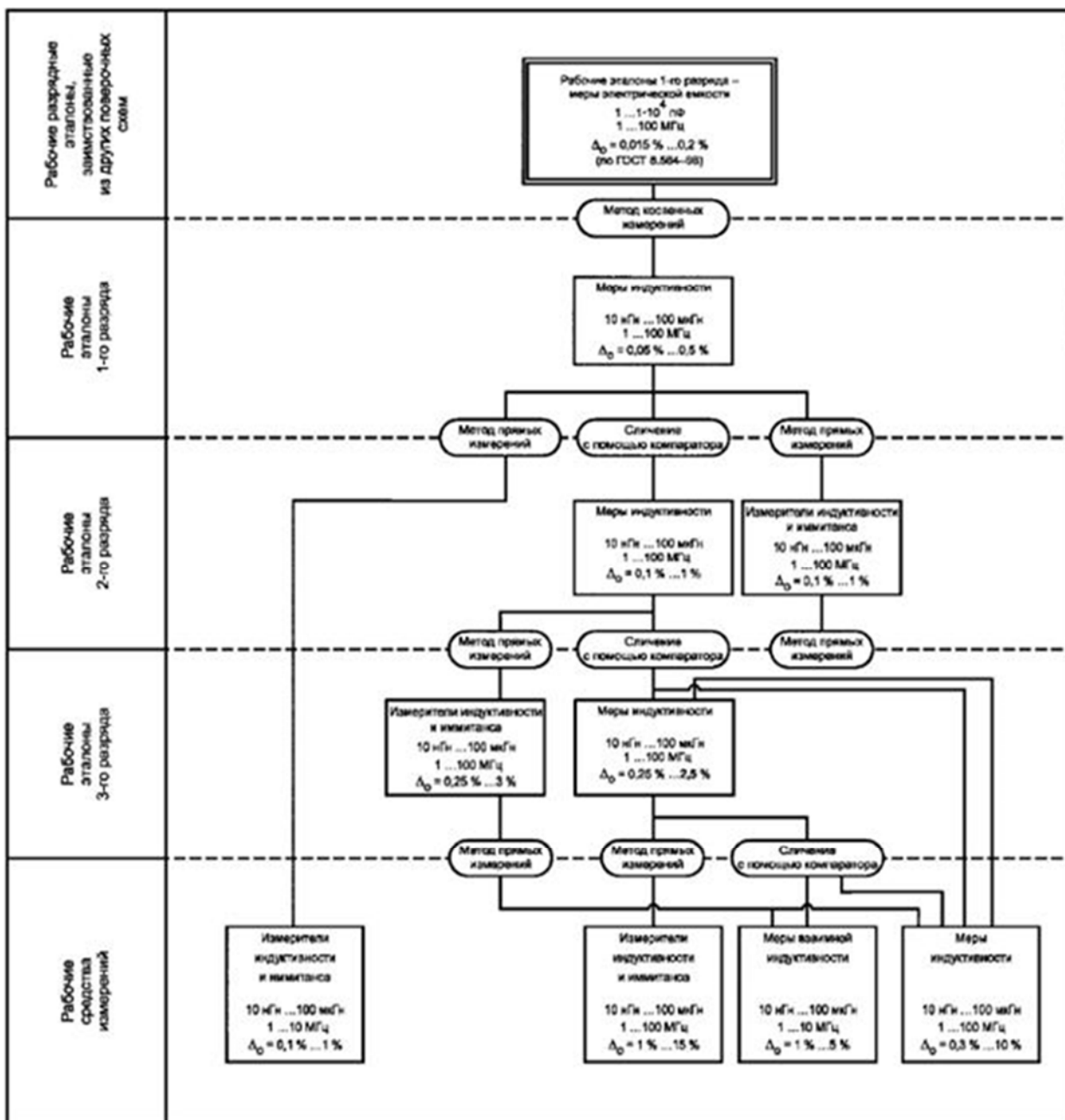


Рисунок 14.5 – Локальная поверочная схема

Следует также отметить, что понятие «ведомственная поверочная схема» подразумевает нормативный документ ведомства. В РМГ 29 это понятие отсутствует, но в литературе встречается довольно часто. Термин «локальная поверочная схема», как следует из определения, вполне успешно заменил «ведомственные поверочные схемы».

Государственные поверочные схемы служат основанием для составления локальных поверочных схем и методик поверки эталонных и рабочих средств измерений. Эти поверочные схемы и методики поверки обычно утверждаются в качестве государственных стандартов. Они включают государственные эталоны, вторичные эталоны, эталонные СИ, рабочие СИ, внесенные в реестр, и методы поверки (методы передачи размера единиц).

Локальные поверочные схемы охватывают только рабочие средства измерений субъекта хозяйствования (или объединения группы субъектов хозяйствования), эталонные средства измерений, необходимые для их поверки, и необходимые методы поверки. Как правило, в качестве исходного эталона в такой схеме используют не государственный или вторичный эталон, а эталонное СИ настолько высокого разряда, чтобы обеспечить поверку входящих в схему наиболее точных рабочих средств измерений. Локальные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам для средств измерений данного вида. Замыкающими элементами цепочек передачи единицы в поверочных схемах являются рабочие СИ. В Государственную поверочную схему, как правило, включают стандартизованные средства измерений. Обычно их подвергают испытаниям и вносят в Государственный реестр СИ. В локальные поверочные схемы часто включают нестандартизованные СИ (специальное СИ, предназначенное для решения конкретной измерительной задачи). Такие средства измерений выпускаются единичными экземплярами или серией в несколько экземпляров, и поэтому нет необходимости в стандартизации требований к ним. Если стандартизация таких средств измерений нерациональна из-за их ограниченного распространения, то проводят их метрологическую аттестацию и включают их в поверочную схему, чем обеспечивают согласование их с эталоном. На основании метрологической аттестации нестандартизованного средства измерений выдают свидетельство (аттестат), в котором, наряду с признанием средства измерений законным, указывают его назначение и метрологические характеристики.

Иногда для поверочных работ разрабатывают специальные поверочные установки. Поверочная установка – измерительная установка, укомплектованная рабочими эталонами и предназначенная для поверки рабочих средств измерений и подчиненных рабочих эталонов.

Отдельную задачу представляет поверка измерительных преобразователей. Они не дают возможности оператору непосредственно воспринимать сигнал измерительной информации. Для его поверки на его вход подают нормированный сигнал измерительной информации. Затем отслеживают преобразованный сигнал.

Поверку обычно осуществляют в специально оборудованных помещениях, где и содержатся рабочие эталоны и поверочные установки. Однако, возможно и наоборот - для поверки рабочих и/или эталонных СИ или для сличения эталонов к их местонахождению доставляют транспортируемый эталон. Например, в Вооруженных Силах используются передвижные лаборатории измерительной техники (ПЛИТ) на базе автомобильной, железнодорожной или авиационной техники.

14.3 Калибровка

Калибровка средства измерений – проведение работ по метрологической оценке, в ходе которых устанавливается соотношение между значением величины, полученным с использованием средства измерений или эталона единицы величины, и значением величины, воспроизводимой и (или) хранимой национальным эталоном единицы величины, эталоном единицы величины того же рода или стандартным образцом, в целях определения действительных метрологических характеристик средства измерений.

В отличие от поверки, при калибровке метрологические характеристики средств измерений не проверяются, а устанавливаются. Калибровке могут подлежать средства измерений, применяемые при измерениях в сфере или вне сферы законодательной метрологии. В сфере законодательной метрологии калибровка осуществляется уполномоченными юридическими лицами из числа юридических лиц, аккредитованных в соответствии с правилами аккредитации на калибровку, а вне сферы - юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями.

Калибровка осуществляется в соответствии с методиками калибровки. В качестве методик калибровки могут использоваться методики калибровки, установленные международными, межгосударственными и государственными стандартами, а также методики калибровки, разработанные юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, осуществляющими калибровку, на основе иерархической схемы калибровки. Интервал времени между калибровками устанавливается юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и иными физическими лицами, применяющими средства измерений с учетом обеспечения метрологических требований к измерениям. При этом интервал времени между калибровками для средств измерений, предназначенных для применения при измерениях в сфере законодательной метрологии и используемых в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах), не может превышать интервал времени между поверками, установленный при утверждении типа средств измерений.

15 Метрологическая прослеживаемость

15.1 Метрологическая прослеживаемость

В самом общем случае понятие «прослеживаемость» определено в СТБ ISO 9001: прослеживаемость – возможность проследить историю, применение или местонахождение того, что рассматривается. В области метрологии используется понятие «метрологическая прослеживаемость», которое широко употребляется в международных стандартах и в рекомендациях, касающихся, прежде всего, требований к калибровочным лабораториям. Прослеживаемость результата измерения к национальному эталону является самым важным условием аккредитации лаборатории на тот или иной вид калибровок.

В нашей стране этот термин тоже начал интенсивно использоваться, хотя более привычным термином, пришедшим из СССР, и в какой-то степени отражающим прослеживаемость, у нас все еще является «поверочная схема». Любая организация, которая выполняет измерения, должна уметь устанавливать и демонстрировать метрологическую прослеживаемость своих результатов измерения (заказчикам, органам по аккредитации и т.п.). В Законе «Об обеспечении единства измерений» метрологическая прослеживаемость рассматривается как один из основных принципов обеспечения единства измерений - метрологическая прослеживаемость результатов измерений до единиц величин международной системы, в первую очередь, воспроизводимых национальными эталонами единиц величин. Сегодня способы обеспечения метрологической прослеживаемости расширены до международных эталонов единиц величин и эталонов иностранных государств для сравнения, воспроизводимых стандартными образцами и референтными методиками измерений.

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений - свойство результата измерений, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений.

Таким образом, метрологическая прослеживаемость необходима для обеспечения единства измерений в стране. Она способствует получению правильных и точных результатов измерений как для решения внутригосударственных вопросов, так и для поддержки экспорта отечественной продукции. На международном уровне метрологическая прослеживаемость является одним из элементов, который обеспечивает международное доверие к эквивалентности измерений и, тем самым, в значительной мере устраняет технические барьеры торговле.

Цепь метрологической прослеживаемости - последовательность эталонов и калибровок, которые используются для соотнесения результата измерения с основой для сравнения. В цепи метрологической

последовательности присутствует иерархия калибровок. Непрерывная цепь калибровок позволяет связать значение величины, воспроизводимой основой для сравнения, с результатом измерения с применением СИ согласно методики измерений. Неопределённость измерения будет возрастать по мере продвижения по цепи калибровок от основы для сравнения (наименьшая неопределённость) до результата измерения (наибольшая неопределённость).

Иерархия калибровки - последовательность калибровок, начиная от основы для сравнения и кончая измерительной системой, причем в этой последовательности результат каждой калибровки зависит от результата предыдущей калибровки.

Отличие поверочной схемы от прослеживаемости заключается в том, что поверочная схема отражает только один элемент прослеживаемости – иерархию СИ. Прослеживаемость демонстрирует цепь калибровок, приводящую к эталону. Поверочная схема также нормирует на каждом этапе передачи размера единицы конкретные интервалы погрешности СИ и метода передачи от эталона к рабочему СИ («сверху вниз»). Для демонстрации метрологической прослеживаемости важно только документально подтвердить неопределенность калибровки на каждом этапе и рассчитать итоговую неопределенность всей цепочки, ведущей от рабочего СИ к эталону («снизу вверх»). Метрологическая прослеживаемость относится именно к результату измерения.

Согласно международному метрологическому словарю и Руководству международной организации по аккредитации лабораторий метрологическая прослеживаемость характеризуется следующими элементами:

неразорванная цепь калибровок, приводящая к национальному или международному эталону;

неопределенность результата калибровки должна быть оценена на каждом этапе цепи в соответствии с утвержденными правилами.

Оценка должна позволять рассчитать суммарную неопределенность всей цепи передачи размера единицы.

Методика калибровки на каждом этапе цепи должна опираться на утвержденные стандарты и методики. Результаты должны регистрироваться. Лаборатории должны быть аккредитованы на техническую компетентность. Кроме того, должен быть выдержан межкалибровочный интервал, величина которого зависит от многих факторов: требуемой точности, частоты использования СИ, способа использования, стабильности приборов.

Таким образом, для того, чтобы установить метрологическую прослеживаемость результатов измерений необходимы следующие основные элементы:

- основа для сравнения;
- непрерывная цепь калибровок;
- неопределенность измерений.

В качестве **основы для сравнения** могут выступать: единица измерения, методика измерений, эталон (в том числе сертифицированный стандартный образец) или их сочетание.

Непрерывная цепь калибровок позволяет связать значение величины, воспроизводимой основой для сравнения, с результатом измерения, который получается с применением измерительной системы согласно методике измерений. Эта связь обеспечивается последовательной калибровкой эталонов (эталон, с менее точными метрологическими характеристиками, по эталонам с более точными метрологическими характеристиками) и на последнем этапе калибровкой измерительной системы по рабочему эталону.

Поскольку калибровка представляет собой процедуру сравнения (сличения) и технически предполагает выполнение измерений, то точность полученных измеренных значений на разных звеньях цепи калибровок будет характеризоваться **оценкой неопределенности**. Неопределенность измерений будет возрастать по мере продвижения по цепи калибровок, от основы для сравнения (наименьшая неопределенность) до результата измерения (наибольшая неопределенность), полученного с применением измерительной системы.

Важность метрологической прослеживаемости заключается в том, что благодаря ей обеспечивается метрологическая сопоставимость результатов измерений. Т.е. результаты измерений независимо от порядка их измеренных значений и соответствующих неопределенностей измерений, понимаются единообразно и их можно сравнивать для различных целей. На рис.? приведена обобщенная блок-схема иерархии калибровок, обеспечивающей метрологическую прослеживаемость результатов измерений. Используя эту схему можно установить метрологическую прослеживаемость результатов измерений для конкретных измерений.

15.2 Обеспечение единства измерений и метрологическая прослеживаемость

Метрологическая прослеживаемость является неотъемлемым условием обеспечения единства измерений. Согласно Закону Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» одним из основных принципов обеспечения единства измерений является прослеживаемость результатов измерений до единиц измерений SI, воспроизводимых национальными эталонами единиц величин и (или) международными эталонами единиц величин. При этом единство измерений трактуется как состояние измерений, при котором результаты этих измерений выражены в допущенных к применению в Республике Беларусь единицах величин, обеспечена метрологическая прослеживаемость, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью. В указанном законе определено как должна быть обеспечена метрологическая прослеживаемость до единиц величин Международной системы единиц (СИ):

путем прямого воспроизведения единицы величины национальным эталоном единицы величины при подтверждении этого воспроизведения путем сличения национального эталона единицы величины с международным эталоном единицы величины или национальным эталоном единицы величины иностранного государства;

путем применения первичной референтной методики (метода) измерений;

путем применения стандартных образцов утвержденного типа, стандартных образцов из международных баз данных сертифицированных стандартных образцов или реестров сертифицированных стандартных образцов национальных метрологических институтов иностранных государств;

путем передачи в процессе поверки размера единицы величины от национального эталона единицы величины или эталона единицы величины иностранного государства средству измерений согласно схеме передачи размера единицы величины (поверочной схеме), установленной техническими актами по обеспечению единства измерений;

путем передачи в процессе калибровки размера единицы величины от национального эталона единицы величины или эталона единицы величины иностранного государства средству измерений согласно схеме передачи размера единицы величины (иерархической схеме калибровки), установленной рекомендациями международных и региональных организаций по метрологии, в которых участвует Республика Беларусь, национальных метрологических институтов иностранных государств или владельцем средства измерений; 1.6. применения референтной методики (метода) измерений, имеющей информацию о метрологической прослеживаемости.

Подтверждение метрологической прослеживаемости до единиц величин Международной системы единиц (СИ) может осуществляться указанием в свидетельствах о поверке, о калибровке или в протоколе измерений информации о реализованной метрологической прослеживаемости, либо иными способами (в рамках деятельности интеграционных образований, на основании рекомендаций международных и региональных организаций по метрологии).

Таким образом, обеспечение единства измерений в стране способствует получению правильных и точных результатов измерений как для решения внутренних государственных и социальных вопросов, так и для поддержки экспорта отечественной продукции. Поэтому сегодня, с целью выполнения всех элементов «метрологической прослеживаемости», одной из современных задач законодательной метрологии является необходимость разработки стандартов и методик калибровки, устанавливающие порядок калибровки, включающий оценку неопределенности.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Целью курсового проектирования является изучение обучающимися различных подходов к оценке точности результатов измерений, приобретение практических навыков статистической обработки результатов прямых многократных измерений, построения модели и оценки результатов измерений.

Основными задачами выполнения курсовой работы являются:

- закрепление и систематизация знаний в области теоретической метрологии;
- формирование умения пользоваться справочной литературой, таблицами, нормативными документами (ТР, ГОСТ и др.);
- закрепление знаний по оценке точности результатов измерений;
- развитие технического мышления.

Курсовой проект выполняется в соответствии с заданием на курсовое проектирование.

Заданием на курсовой проект устанавливаются:

- тема курсового проекта;
- сроки сдачи готового курсового проекта;
- исходные данные;
- содержание пояснительной записки курсового проекта;
- требования к выполнению графического материала;
- дата выдачи задания;
- календарный график работы над курсовым проектом;
- ответственность исполнителя.

Тема курсового проекта выбирается в соответствии с вариантом, предлагаемым руководителем.

Примерный перечень тем курсовых проектов:

1. Математическая обработка результатов измерения отклонения от прямолинейности образующей наружной номинально конической поверхности детали;

2. Математическая обработка результатов измерения отклонения от параллельности образующей внутренней номинально конической поверхности детали;

3. Математическая обработка результатов измерения сопротивления заземления с помощью амперметра и вольтметра;

4. Математическая обработка результатов измерения мощности постоянного тока, рассеиваемой на нагрузке, с помощью амперметра и вольтметра;

5. Математическая обработка результатов измерения площади цилиндрической детали;

6. Математическая обработка результатов измерения длины волны СВЧ колебаний в линии передачи помощью электросчетного частотомера (ЭСЧ);

В курсовом проекте каждому исполнителю предлагается индивидуальный массив данных результатов многократных измерений физической величины согласно заданию на курсовое проектирование. Объект измерений назначается индивидуально каждому студенту. Исполнитель имеет право предложить свою тему проекта, которая утверждается по согласованию с руководителем проекта.

В соответствии с учебным планом на выполнение курсового проекта отводится всего 90 часов самостоятельной работы.

Объем курсовой работы составляет 35-40 страниц формата А4.

Перечень вопросов, которые подлежат разработке в учебных аудиториях в ходе консультаций по курсовому проектированию:

1. Анализ точечных диаграмм, построенных по массиву данных результатов прямых измерений.
2. Анализ гистограмм с целью проверки принадлежности массива данных результатов прямых измерений к нормальному закону распределения.
3. Определение формулы косвенных измерений согласно заданию на курсовое проектирование.
4. Разработка математической модели косвенного измерения при разработке методики оценивания неопределенности измерений.
5. Составление бюджета неопределенности измерений.
6. Представление конечного результата измерений.

В качестве исходных данных предлагаются варианты решения поставленной измерительной задачи согласно заданию на курсовое проектирование, массивы данных результатов прямых многократных измерений, официальные издания НПА РБ в области обеспечения единства измерений.

При выполнении курсового проекта необходимо в соответствии с заданной темой проекта идентифицировать объект измерения, осуществить обзор возможных методов измерения предложенных физических величин, предложить метод измерения и выбрать средства измерений, построить и провести анализ точечных диаграмм результатов прямых многократных измерений, построить и провести анализ гистограмм распределения, провести оценивание неопределенности измерений и представить конечный результат измерений. При работе над курсовым проектом рекомендуется использовать:

- тематическую литературу в области теоретической метрологии;
- официальный сайт Госстандарта РБ, БелГИМ.

В разделе 1 студент должен провести анализ измерительной задачи и предложить метод измерения физической величины согласно заданию на курсовое проектирование.

В данном разделе студент проводит идентификацию физической величины, проводит обзор возможных методов ее измерения, предлагает метод измерения, проводит подбор необходимых средств измерений и анализ их метрологических характеристик.

В разделе 2 студент практически осуществляет статистическую обработку массива данных прямых многократных измерений, входящих в измерительную задачу. Для этого проводится построение точечных диаграмм с целью выявления погрешностей измерения и характера их поведения, а также осуществляется построение гистограммы для проверки принадлежности распределения массива данных к нормальному закону. Результатом является расчет оценок прямых многократных измерений и запись результата в рамках теории погрешностей.

Справочные данные для использования критерия согласия Колмогорова приведены в Приложении А.

Справочные данные для коэффициентов распределения Стьюдента (t-распределение) приведены в Приложении Б.

В разделе 3 студент осуществляет оценивание точности поставленной измерительной задачи в рамках концепции неопределенности. С этой целью проводится анализ входных величин и разрабатывается математическая модель измерения. На базе разработанной модели определяются неопределенности входных величин и рассчитывается неопределенность выходной величины. По результатам расчета составляется бюджет неопределенностей и представляется конечный результат измерения.

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Закон Республики Беларусь от 11 ноября 2019 г. № 254-З «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями и дополнениями).

ГОСТ 8.010-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения».

ГОСТ 8.207-76 «Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений основные положения».

ГОСТ 8.009-84 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

ГОСТ 11.002-73 «Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений».

ГОСТ ISO/IEC 17025 2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

ГОСТ 34100.3-2017 «Руководство по выражению неопределенности измерения».

РМГ 29-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения».

РМГ 43-2001 «Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».

РМГ 91-2009 «Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения».

Приложение А

Значения вероятностей $P(\lambda)$

λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$
0,30	1,000	0,60	0,864	0,90	0,393	1,40	0,040	2,0	0,0007
0,35	0,999	0,65	0,792	0,95	0,327	1,50	0,022	2,10	0,0003
0,40	0,997	0,70	0,711	1,00	0,270	1,60	0,012	2,20	0,0001
0,45	0,987	0,75	0,627	1,10	0,178	1,70	0,006	2,30	0,0001
0,50	0,964	0,80	0,544	1,20	0,112	1,80	0,003	2,40	0,0000
0,55	0,923	0,85	0,465	1,30	0,068	1,90	0,002	2,50	0,0000

Приложение Б

Предельное значение $v_{ДОП}$

Число наблюдений <i>, n</i>	Предельное значение $v_{ДОП}$ при уровне значимости q			
	0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,42	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71

Значение функция Лапласа $\Phi(t)$

	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0,00	0,0000	0,92	0,3210	1,78	0,4620	2,69	0,4965	
0,01	0,0040	0,94	0,3265	1,80	0,4640	2,70	0,4965	
0,03	0,0120	0,96	0,3315	1,82	0,4655	2,72	0,4965	
0,05	0,0200	0,98	0,3365	1,84	0,4670	2,74	0,4970	
0,08	0,0320	1,00	0,3415	1,86	0,4685	2,75	0,4970	
	0,10	0,0400	1,01	0,3440	1,88	0,4700	2,76	0,4970
0,12	0,0480	1,02	0,3460	1,90	0,4715	2,78	0,4975	
0,13	0,0515	1,03	0,3485	1,92	0,4725	2,80	0,4975	
0,15	0,0595	1,04	0,3510	1,94	0,4740	2,82	0,4975	
0,17	0,0675	1,05	0,3530	1,96	0,4750	2,84	0,4975	
0,20	0,0795	1,06	0,3555	1,98	0,4760	2,86	0,4980	
0,22	0,0870	1,08	0,3600	2,00	0,4775	2,88	0,4980	
0,24	0,0950	1,10	0,3645	2,02	0,4785	2,90	0,4980	
0,26	0,1025	1,12	0,3685	2,04	0,4795	2,92	0,4980	
0,28	0,1105	1,14	0,3730	2,06	0,4805	2,94	0,4985	
0,30	0,1180	1,16	0,3770	2,08	0,4810	2,96	0,4985	
0,32	0,1255	1,18	0,3810	2,10	0,4820	2,98	0,4985	
0,34	0,1330	1,20	0,3850	2,12	0,4830	3,00	0,4986	
0,36	0,1405	1,22	0,3890	2,14	0,4840	3,10	0,4986	
0,38	0,1480	1,24	0,3925	2,16	0,4845	3,20	0,4993	
0,40	0,1555	1,26	0,3960	2,18	0,4855	3,30	0,4995	
0,42	0,1630	1,28	0,4000	2,20	0,4860	3,40	0,4996	
0,44	0,1700	1,30	0,4030	2,22	0,4870	3,50	0,4997	
0,46	0,1770	1,32	0,4065	2,24	0,4875	3,60	0,4998	
0,48	0,1845	1,34	0,4100	2,26	0,4880	3,70	0,4999	
0,50	0,1915	1,36	0,4130	2,28	0,4885	3,80	0,4999	
0,52	0,1985	1,38	0,4160	2,30	0,4895	4,00	0,4999	
0,54	0,2055	1,40	0,4190	2,32	0,4900	5,00	0,49999	
0,56	0,2125	1,42	0,4220	2,34	0,4905			
0,58	0,2190	1,44	0,4250	2,36	0,4910			
0,60	0,2255	1,46	0,4280	2,38	0,4915			
0,62	0,2325	1,48	0,4305	2,40	0,4920			
0,64	0,2390	1,50	0,4330	2,42	0,4920			
0,66	0,2455	1,52	0,4355	2,44	0,4925			
0,68	0,2520	1,54	0,4380	2,46	0,4930			
0,70	0,2580	1,56	0,4405	2,48	0,4935			
0,72	0,2640	1,58	0,4430	2,50	0,4940			
0,74	0,2705	1,60	0,4450	2,52	0,4940			
0,76	0,2765	1,62	0,4475	2,54	0,4945			

0,78	0,2825	1,64	0,4495	2,56	0,4950
0,80	0,2880	1,66	0,4515	2,58	0,4950
0,82	0,2940	1,68	0,4535	2,60	0,4955
0,84	0,2995	1,70	0,4555	2,62	0,4955
0,86	0,3050	1,72	0,4575	2,64	0,4960
0,88	0,3105	1,74	0,4590	2,66	0,4960
0,90	0,3160	1,76	0,4610	2,68	0,4965

Приложение Г

Значения коэффициентов Стьюдента

Число измерений n	Доверительная вероятность (надежность), p			
	0,90	0,95	0,99	0,999
2	6,314	12,706	63,657	636,619
3	2,920	4,303	9,925	31,598
4	2,353	3,182	5,841	12,941
5	2,132	2,776	4,604	8,610
6	2,015	2,571	4,032	6,859
7	1,943	2,447	3,707	5,959
8	1,895	2,365	3,499	5,405
9	1,860	2,306	3,355	5,041
10	1,833	2,262	3,250	4,781