



Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МЕТРОЛОГИЯ

Учебное пособие

Королев
2018

УДК 006.9
ББК 30.10
М54

Рецензент: д.т.н. Озерский М.Д.

М54 **Метрология** [Текст] учебное пособие / Г.П. Богданов, В.Г. Исаев, О.А. Воейко, Ю.А. Клейменов. – Королев МО: МГОТУ, 2018. – 222 с.

В учебном пособии изложены основы метрологии как науки об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, приведены основные сведения о единицах физических величин, обеспечении единообразия средств измерений, а также рассмотрены погрешности измерений и методы обработки результатов измерений.

Учебное пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям подготовки 27.03.02 «Управление качеством» и 27.03.05 «Инноватика» и рекомендуется для использования в учебном процессе по техническим и экономическим специальностям при изучении в вузе тематики, связанной с измерениями, технологическими процессами, в том числе инновационными, и управлением качеством.

ISBN

© МГОТУ, 2018
© Богданов Г.П., Исаев В.Г.,
Воейко О.А., Клейменов Ю.А., 2018

Содержание

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	4
1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ	8
1.1. Предмет и задачи метрологии.....	8
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ	13
2.1. Основное уравнение измерений. Основные единицы физических величин	13
2.2. Международная система единиц СИ.....	16
2.2.1. Правила написания обозначений единиц	26
2.3. Эталоны основных единиц физических величин и их классификация.....	29
3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ	35
3.1. Принципы, методы измерений и их классификация.....	35
3.2. Качество измерений. Погрешности измерений и их классификация	40
3.2.1. Показатели качества измерений	40
3.2.2. Классификация погрешностей измерений	42
3.3. Функции и законы распределения погрешностей.....	47
4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ	54
4.1. Классификация средств измерений	54
4.2. Классификация радиоизмерительных приборов.....	58
4.3. Метрологические характеристики средств измерений. Классификация погрешностей средств измерений	61
4.4. Нормируемые метрологические характеристики и классы точности средств измерений	67
4.5. Классы точности средств измерений	68
4.6. Формы представления классов точности средств измерений.....	70
4.7. Метрологическая надежность и виды технического состояния средств измерений	76
5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	82
5.1. Поверочные схемы и виды поверок средств измерений	82
5.2. Виды поверок	86
5.3. Способы определения объема поверяемых параметров средств измерений	88
5.4. Способы определения периодичности поверки средств измерений.....	97
5.5. Достоверность поверки средств измерений	101
5.6. Государственная система обеспечения единства измерений и ее законодательная база	108
5.7. Федеральный закон «О техническом регулировании»	112
5.8. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений»	115

5.9. Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации»	121
6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	123
6.1. Обработка результатов прямых измерений.....	123
6.2. Обработка результатов косвенных измерений.....	127
6.3. Обнаружение грубых погрешностей измерений.....	130
6.4. Обработка результатов неравноточных рядов (групп) измерений	132
6.5. Обработка результатов совокупных и совместных измерений	135
7. РАЗРАБОТКА И АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ	140
7.1. Требования к методикам выполнения измерений.....	140
7.2. Построение и изложение документов на МВИ	143
7.3. Разработка методик выполнения измерений.....	145
7.4. Аттестация методик выполнения измерений	156
7.5. Критерии отнесения методик выполнения измерений к методикам, подлежащим аттестации.....	162
7.5.1. Пример применения критериев отнесения МВИ к методикам, подлежащим аттестации.....	171
7.6. Аккредитация организаций на право аттестации методик выполнения измерений.....	174
7.6.1. Условия аккредитации.....	174
7.6.2. Порядок проведения аккредитации.....	175
7.6.3. Программа выполнения работ по аккредитации метрологической службы на право аттестации методик измерений и проведения метрологической экспертизы документов	177
8. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	179
8.1. Цели и задачи метрологического обеспечения испытательного оборудования.....	179
8.2. Показатели точности и надежности испытательного оборудования	184
8.3. Выбор средств измерений для аттестации испытательного оборудования.....	194
8.4. Аттестация испытательного оборудования	204
8.4.1. Порядок проведения аттестации испытательного оборудования.....	204
Приложение А	212
Приложение Б.....	215
Приложение В	218
Приложение Г.....	220
ЛИТЕРАТУРА.....	221

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АЦП – аналого-цифровой прибор;
ГМКиН – государственный метрологический контроль и надзор;
ГМС – государственная метрологическая служба;
ГМНЦ – государственный научный метрологический центр;
ГСИ – государственная система обеспечения измерений;
ИИС – информационно-измерительный центр;
ИЛ – измерительная лаборатория;
МВА – межведомственная аттестация;
МВИ – межведомственные испытания;
МСП – метрологическая служба предприятия;
МНИ – межповерочные интервалы;
МХ – метрологическая характеристика;
НТД – нормативно-техническая документация;
ОЕИ – обеспечение единства измерений;
РЭА – радиоэлектронная аппаратура;
ССД – стандартные справочные данные;
СИ – средства измерений;
СО – стандартный образец;
ТУ – технические условия;
ТЗ – техническое задание;
ФЗ – федеральный закон;
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
ЭДС – электродвижущая сила;
ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие охватывает часть курса «Метрология, стандартизация и сертификация», входящего в учебный план по направлению подготовки «Управление качеством», а также «Метрология и сертификация», входящего в учебный план по направлению подготовки «Инноватика».

Быстрые изменения, происходящие в социально-экономической сфере, требуют адекватной реакции высшей школы. Появилась необходимость пересмотра содержания теоретической метрологии с учётом внедрения инновационных технологий в сферу производства, что нашло отражение в учебном пособии, в частности, в ориентации будущих специалистов в области управления качеством и инноватики на самостоятельное принятие решений по результатам измерительного контроля.

Необходимость издания настоящего пособия продиктована новыми прикладными задачами метрологии, которые следует решать в быстро меняющихся условиях специалистам в области качества продукции и услуг. К этим задачам следует отнести методические вопросы разработки, экспертизы и аттестации методик выполнения измерений, применяемых при контроле качества и испытаниях продукции. До настоящего времени в учебной литературе данные вопросы почти не освещались.

Практика показывает, что в начале своей трудовой деятельности специалист в области качества и инноватики, как правило, испытывает определённые трудности при эксплуатации испытательного оборудования средств измерений и контроля. С учётом этого в данном пособии более подробно изложены методические основы метрологического обеспечения эксплуатации испытательного оборудования, являющегося технической базой системы оценки качества. Более углублённо в пособии освещены методические основы периодической поверки средств измерений.

Следует отметить, что в своем пособии авторы опираются на современные регламентирующие документы в области обеспечения единства измерений и технической политики в отечественном и зарубежном законодательстве. Используемые термины и определения также приведены в соответствии с действующими нормативными документами. С методической точки зрения это представляется полез-

ным для подготовки бакалавров к самостоятельной работе с нормативной документацией в области метрологии.

При подготовке материалов по основам метрологии авторы в первую очередь ставили перед собой задачу представить информацию, органически связанную с вопросами метрологического обеспечения процесса испытаний и контроля качества продукции.

Авторы глубоко признательны сотрудникам кафедры «Управление качеством и стандартизации» Технологического университета и отдела испытаний «ГНМЦ» Минобороны РФ за полезные критические замечания, высказанные при обсуждении данного учебного пособия.

1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1.1. Предмет и задачи метрологии

Отраслью науки, изучающей измерения и средства их выполнения, является метрология. Термин «метрология» образован из двух греческих слов: «метрон» – мера и «логос» – учение. Дословный перевод с греческого обозначает – учение о мерах.

Метрология в её современном понимании – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Основопологающим понятием метрологии является *измерение* – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с её единицей и получение значения этой величины.

Измерения считаются самыми массовыми повторяющимися процедурами. Сегодня невозможно себе представить промышленное производство, транспорт, связь и научные исследования, где не использовались бы результаты измерений. В этом смысле метрология является областью практической деятельности.

Основной предмет измерений – физические величины. Под *физической величиной* понимают одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них. Количественное содержание этого свойства в объекте является *размером физической величины*, а числовое её определение называют *значением физической величины*.

Единство измерений – состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы. В этом определении основным является представление результатов измерений в узаконенных единицах, которые были бы одними и теми же всюду, где проводятся измерения и используются их результаты.

Точность измерений характеризуется близостью их результатов к истинному (действительному) значению измеряемой величины. Таким образом, важнейшей задачей метрологии является обеспечение единства и требуемой точности измерений.

Метрология имеет следующие разделы: теоретическая метрология, законодательная метрология, практическая (прикладная) метрология.

Теоретическая метрология – раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии. Иногда применяют термин «фундаментальная метрология».

Законодательная метрология – раздел метрологии, предмет которого – установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений в интересах общества.

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

Рассматриваемые в метрологии величины должны быть измеримыми в принципе, т.е. иметь единицу измерений для сопоставления. Очевидно, что если нет единицы измерений, то не может быть и измерения. Таким образом, измеряемость величин – это краеугольный камень метрологии.

В фундаментальной метрологии сформулированы условия измеряемости в виде следующих аксиом [1].

Аксиома 1. Измерение возможно, если возможно выделение данной величины среди других величин.

Аксиома 2. Измерение возможно, если возможно установление единицы измерений выделенной величины.

Аксиома 3. Измерение возможно при создании средства измерения, воспроизводящего установленную единицу измерений и хранящего её размер.

Аксиома 4. Измерение возможно при сохранении неизменным размера единицы в пределах установленной погрешности как минимум на срок, необходимый для одного измерения или одной серии измерений.

К основным задачам, которые решает современная метрология, относятся:

- 1) развитие фундаментальной теории измерений;
- 2) разработка новых принципов и методов измерений;
- 3) разработка новых СИ и измерительной техники;
- 4) развитие теории погрешностей измерений (методов определения точности измерений);
- 5) создание совершенного парка эталонов и стандартных образцов на базе научно обоснованного выбора единиц физических величин и констант;
- 6) совершенствование методов передачи размеров единиц;
- 7) разработка законодательных основ обеспечения единства измерений и единообразия СИ (развитие законодательной метрологии).

Отдельной задачей метрологии является метрологическое обеспечение разработки, производства продукции и эксплуатации технических объектов (систем). *Метрологическое обеспечение* технических объектов представляет собой комплекс научно-технических и организационно-технических мероприятий, а также соответствующую деятельность организаций (учреждений) и специалистов, направленных на обеспечение единства и точности измерений для достижения требуемых характеристик функционирования объектов. В настоящее время термин «метрологическое обеспечение» принято понимать в широком и узком смысле [1,8]. В широком смысле метрологическое обеспечение включает:

- теорию и методы обеспечения достоверного контроля параметров и характеристик технических объектов;
- теорию и методы обеспечения точности и единства измерений;
- разработку и аттестацию методик выполнения измерений;
- разработку СИ и контроля (рабочих и специальных эталонов, рабочих СИ);
- организационно-технические вопросы обеспечения единства измерений, единообразия применяемых СИ, планирование выполнения измерений.

В узком смысле под метрологическим обеспечением понимают:

- надзор за применением установленной системы единиц физических величин;

- обеспечение единства и точности измерений посредством рациональных способов передачи размеров единиц физических величин от эталонов к рабочим СИ;

- метрологический надзор за методиками выполнения измерений и методиками аттестации испытательного оборудования, применяемого для испытания продукции;

- надзор за состоянием СИ;

- исследование параметров и характеристик продукции, технических объектов для определения требований к объему и качеству измерений и контроля (номенклатура измеряемых параметров, пределы допустимого изменения параметров объектов при условии сохранения работоспособности, показатели достоверности измерительного контроля);

- рациональный выбор СИ из числа серийно выпускаемых.

На этапе производства продукции основными задачами метрологического обеспечения являются:

- определение номенклатуры и состава параметров, норм точности измерений, обеспечивающих достоверность входного и приёмочного контроля изделий, узлов, деталей и элементов; входной контроль является одним из важных факторов повышения качества и надежности продукции, поэтому именно с входного контроля комплектующих элементов (изделий) следует начинать метрологическое обеспечение новых образцов техники;

- проведение метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации;

- анализ и контроль условий выполнения измерений;

- анализ и контроль технологических процессов с точки зрения номенклатуры и последовательности измерительных операций;

- обеспечение технологических процессов наиболее совершенными методиками выполнения измерений;

- обеспечение (снабжение, разработка, изготовление) производства при необходимости специальных СИ;

- разработка локальных поверочных схем и своевременное проведение поверки (калибровки) и ремонта СИ;

- подготовка производственного персонала к выполнению измерений;

- проведение метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации.

Методическое руководство по метрологическому обеспечению производства продукции осуществляют метрологические службы ведомства или предприятия.

На этапе эксплуатации технических объектов (основной и наиболее длительный этап жизненного цикла) задачами метрологического обеспечения являются:

- обеспечение служб эксплуатации технических объектов штатными СИ, вспомогательными устройствами и методиками измерений;

- надзор за правильным использованием СИ при подготовке технического объекта к применению, техническому обслуживанию и ремонту;

- надзор за состоянием СИ, за соблюдением сроков их поверки и интенсивность расходования технического ресурса;

- разработка методик поверки СИ, встроженных в технические устройства, а также при невозможности реализовать стандартизованные методики;

- создание обменного фонда измерительной техники для восполнения выбывающих из сферы эксплуатации средств измерений (выработка технического ресурса, нахождение в ремонте, на поверке).

Исходя из исторически сложившейся в метрологии двойственной направленности деятельности, получившей отражение в определении «метрология», выделяют два связанных понятия: «измерение» и «обеспечение единства измерений». Эти направления деятельности учтены при написании данного учебного пособия.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ

2.1. Основное уравнение измерений. Основные единицы физических величин

Значение физической величины может быть получено при условии, что имеется её мера – единица физической величины. Термин «физическая величина» определяет свойства, изучаемые не только в физике, но и в других науках, если для оценки их количественного содержания в разных объектах измерений требуется применение физических методов. Всякое измерение есть количественное познание свойств того или иного материального объекта.

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

Единица измерений физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

Род физической величины – это качественная определенность физической величины, например, длина и диаметр детали – однородные величины, а длина и масса – неоднородные.

При сравнении размеров однородных величин между собой, в частности с выбранной единицей физической величины, осуществляется процесс измерения, т.е. определяется некоторое числовое значение с указанием единицы физической величины:

$$X = q [X], \quad (2.1)$$

где X – значение измеряемой физической величины; q – численное значение величины; $[X]$ – единица физической величины.

Уравнение (2.1) является *основным уравнением* измерений. Оно показывает, что числовое значение измеренной величины зависит от размера принятой единицы.

Действительное значение физической величины – это значение физической величины, полученное экспериментальным путём и

настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

В природе объективно существуют взаимосвязи между свойствами объектов. Эти связи описываются системой уравнений, которая в общем виде называют уравнениями связи между величинами.

Уравнение связи между величинами – уравнение, отражающее связь между величинами, обусловленную законами природы, в которой под буквенными символами понимают физические величины.

Для упорядочения и удобства пользования, физические величины разделяют на основные и производственные. В качестве основных физических величин выбирают такие, посредством которых удаётся однозначно выразить производные с помощью известных зависимостей между величинами. При этом основные и соответствующие им производные величины образуют единую систему физических величин.

Система физических величин – это совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие определяют как функции независимых величин. Принцип построения системы заключается в следующем:

- система физических величин должна быть построена для величин, между которыми имеется однозначная связь, выраженная математическим уравнением;
- построение системы не должно быть связано конкретными размерами основных единиц.

Основные физические величины должны выбираться из соображений, чтобы при минимальном их числе можно было бы получить максимальное количество производных величин. Как отмечалось ранее, производные физические величины определяются на основании уравнения связи с основными величинами. Большинство уравнений связи можно представить в виде:

$$Z = R^{\omega}, X_1^{\alpha}, X_2^{\beta}, X_3^{\gamma}, X_k^{\chi}, \quad (2.2)$$

где Z – производная величина; X_i , $i = 1, k$ – основные физические величины; R – коэффициент (число), не зависящий от выбора единиц; ω , α , β , γ , \dots, χ – показатели степени, с которыми данная величина входит в уравнение, определяя производную величину; они могут быть положительными, отрицательными, целыми, дробными или равными нулю.

Для определения размерности производной величины уравнение связи (2.2) приводят к уравнению размерности:

$$\dim Z = \dim(X_1^\alpha, X_2^\beta, X_3^\gamma, X_k^x) = [X_1^\alpha] \times [X_2^\beta] \dots [X_k^x]. \quad (2.3)$$

Символ \dim образован от английского слова dimension, обозначающего в переводе размерность.

Размерность физической величины – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в разных степенях, и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1. Понятие размерность распространяется и на основные величины. Размерность основной величины в отношении собой себя равна единице, т.е. формула размерности основной величины совпадает с её символом. Основные единицы обозначаются символами, как правило, прописными латинскими буквами. Так, единицами длины L, массы M и времени T служат метр, килограмм и секунда, что обозначается следующим образом:

$$[L] = \text{м}; [M] = \text{кг}; [T] = \text{с}.$$

Соответственно размерность производной величины от указанных основных физических величин может быть представлена уравнением:

$$\dim Z = [L]^\alpha, [M]^\beta, [T]^\gamma.$$

Например, размерность производной величины скорости находят из уравнения связи:

$$V = l/t,$$

где l – расстояние (длина пути); t – время.

Подставим вместо длины l и времени t их размерности $\dim(l) = L$ и $\dim(t) = T$. Тогда для системы основных единиц LMT размерность скорости будет

$$\dim(V) = \frac{L}{T} = L M^0 T^{-1} = L T^{-1} = \text{мс}^{-1}.$$

Размерности физических величин выполняют важную роль при проверке теоретических выводов, представленных сложными математическими выражениями. На практике широко используют правило, по которому размерности левой и правой части уравнения должны быть обязательно одинаковыми. Если размерности неодинаковы, то это означает, что в процессе вывода формулы была допущена ошибка.

2.2. Международная система единиц СИ

Наличие большого количества различных систем единиц физических величин (СГС, СГСМ, МК ГСС, МТС, МКСА и др.) обуславливало неудобства, связанные с пересчётом при переходе от одной единицы к другой. Расширяющиеся международные научно-технические и экономические связи потребовали унификации единиц физических величин в международном масштабе.

Поэтому во второй половине XX века совместными усилиями учёных разных стран была разработана наиболее совершенная в настоящее время метрологическая система – Международная система единиц (СИ).

СИ – международная транскрипция, образованная из начальных букв французского названия этой системы «Systeme International».

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила Международную систему единиц: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, кандела, моль. В качестве дополнительных единиц в системе СИ (СИ) приняты: для величин плоского угла – радиан, для величины телесного угла – стерadian. В нашей стране с 1963 г. эта системы применяется как предпочтительная во всех отраслях науки и техники, при производстве продукции, а также при преподавании.

Особенностью системы единиц СИ (СИ) является то, что производные единицы образуются с помощью простейших уравнений связи между величинами определяющих уравнений, в которых величины приняты равными единицам основных величин.

В таблице 1 приведены основные, дополнительные и важнейшие производные единицы системы СИ (СИ), их определения и обозначения [1,3,8].

Таблица 1 – Основные и дополнительные единицы СИ

Величина		Единица			
		наименование	обозначение		определение
размерность	международное		русское		
Длина	L	метр	m	м	Метр равен 1/299 792 458 длины волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона - 86 [XII ГКМВ (1960 г.)]. Резолюция 6]
Масса	M	килограмм	kg	кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1889 г.) и III ГКМВ (1901 г.)]
Время	T	секунда	s	с	Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия - 133 [XIII ГКМВ (1967 г.)]. Резолюция 1]
Сила электрического тока	I	ампер	A	A	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н [МКМВ (1946 г.)]. Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948 г.)]
Термодинамическая температура	θ	кельвин	K	K	Кельвин равен 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды [XIII ГКМВ (1967 г.)]. Резолюция 4]

Величина		Единица		
		наименование	размерность	русское обозначение
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц [XIV ГКМВ (1971 г.), Резолюция 3]

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

Примечания:

1. Кроме температуры Кельвина (обозначение T) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ K по определению. Температура Кельвина выражается в Кельвинах, температура Цельсия – в градусах Цельсия (обозначение международное и русское °C). По размеру градус Цельсия равен Кельвину.
2. Интервал или разность температур Кельвина выражают в Кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускаются выражать как в Кельвинах, так и в градусах Цельсия.
3. Обозначение Международной практической температуры в Международной практической температурной шкале 1968 г., если её необходимо отличить от термодинамической температуры, образуется путём добавления к обозначению термодинамической температуры индекса «68» (например, T₆₈ или (t₆₈)).
4. Единство световых измерений обеспечивается в соответствии с ГОСТ 8.0(23–74).

Дополнительные единицы СИ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Дополнительные единицы СИ

Наименование величины	Единица			определение
	наименование	обозначение		
		международное	русское	
Плоский угол	радиан	rad	рад	Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	стерадиан	sr	ср	Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

Производные единицы СИ следует образовывать из основных и дополнительных единиц СИ по правилам образования когерентных производных единиц (см. обязательное приложение 1). Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования, также могут быть использованы для образования других производных единиц СИ. Производные единицы, имеющие специальные наименования, и примеры других производных единиц приведены в таблицах 3–5.

Примечание. Электрические и магнитные единицы СИ следует образовывать в соответствии с рационализованной формой уравнений электромагнитного поля

Таблица 3 – Примеры производных единиц СИ, наименования которых образованы из наименований основных и дополнительных величин

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	
			международное	русское
Площадь	L^2	квадратный метр	m^2	$м^2$
Объем, вместимость	L^3	кубический метр	m^3	$м^3$
Скорость	LT^{-1}	метр в секунду	m/s	$м/с$
Угловая скорость	T^{-1}	радиан в секунду	rad/s	$рад/с$
Ускорение	LT^{-2}	метр на секунду в квадрате	m/z^2	$м/с^2$

Угловое ускорение	T^{-2}	радиан на секунду в квадрате	rad/z^2	$рад/с^2$
Волновое число	L^{-1}	метр в минус первой степени	m^{-1}	$м^{-1}$
Плотность	$L^{-3}M$	килограмм на кубический метр	kg/m^3	$кг/м^3$
Удельный объем	L^3M^{-1}	кубический метр на килограмм	m^3/kg	$м^3/кг$
Плотность электрического тока	$L^{-2}I$	ампер на квадратный метр	A/m^2	$А/м^2$
Напряженность магнитного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/m	$А/м$
Молярная концентрация	$L^{-3}N$	моль на кубический метр	mol/m^3	$моль/м^3$
Поток ионизирующих частиц	T^{-1}	секунда в минус первой степени	s^{-1}	$с^{-1}$
Плотность потока частиц	$L^{-2}T^{-1}$	секунда в минус первой степени - метр в минус второй степени	$s^{-1} m^{-2}$	$с^{-1} \bullet м^{-2}$
Яркость	L^{-2}	Кандела на квадратный метр	cd/m^2	$кд/м^2$

Таблица 4 – Производные единицы СИ, имеющие специальные названия

Величина	наименование	размерность	наименование	Единица		выражение через основные и дополнительные единицы СИ
				обозначение	русское	
Частота		T^{-1}	герц	Гц		s^{-1}
Сила, вес		LMT^{-2}	ньютон	Н		$m\ kg\ s^{-2}$
Давление, механическое напряжение, модуль упругости		$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па		$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты		L^2MT^{-2}	джоуль	Дж		$m^2\ kg\ s^{-2}$
Мощность, поток энергии		L^2MT^{-3}	ватт	Вт		$m^2\ kg\ s^{-3}$
Количество электричества (электрический заряд)		ТI	кулон	Кл		$S \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила		$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	В		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость		$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	Ф		$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление		$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ом		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость		$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сиemens	См		$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции, магнитный поток		$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция		$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл		$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность		$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$

Световой поток	J	люмен	lm	лм	cd • sr
Освещенность	L ⁻² J	люкс	lx	лк	m ⁻² cd • sr
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радонуклида)	T ⁻¹	беккерель	Bq	Бк	s ⁻¹
Поглощенная доза излучения, керма, показатель поглощенной дозы (поглощенная доза ионизирующего излучения)	L ² T ⁻²	грэй	Gy	Гр	m ² • s ⁻²
Эквивалентная доза излучения	L ² T ⁻²	зиверт	Sv	Зв	m ² • s ⁻²

Таблица 5 – Примеры производных единиц СИ, наименования которых образованы с использованием специальных наименований, приведенных в таблице 4

Величина	размерность	наименование	Единица		выражение через основные и дополнительные единицы СИ
			международное	русское	
Момент силы	L ² MT ⁻²	ньютон-метр	N • m	Н • м	m ² • kg • s ⁻²
Поверхностное натяжения	MT ⁻²	ньютон на метр	N/m	Н/м	kg • s ⁻²
Динамическая вязкость	L ⁻¹ MT ⁻¹	паскаль-секунда	Pa•s	Па•с	m ⁻¹ • kg • s ⁻¹
Пространственная плотность электрического заряда	L ⁻³ T I	кулон на кубический метр	C/m ³	Кл/м ³	m ⁻³ • s • A
Электрическое смещение	L ⁻² T I	кулон на квадратный метр	C/m ²	Кл/м ²	m ⁻² • s • A
Напряженность электрического поля	LMT ⁻³ I ⁻¹	вольт на метр	V/m	В/м	m • kg • s ⁻³ • A ⁻¹

Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$L^{-3}M^{-1}T^{-4}I^2$	фарад на метр	F/m	Φ/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Абсолютная магнитная проницаемость	$LM T^{-2}I^{-2}$	генри на метр	H/m	Гн/м	$m \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Удельная энергия	$L^2 T^{-2}$	джоуль на килограмм	J/kg	Дж/кг	$m^2 \cdot s^{-2}$
Теплоемкость системы, энтропия системы.	$L^2 M T^{-2} \theta^{-1}$	джоуль на кельвин	J/K	Дж/К	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	$L^2 T^{-2} \theta^{-1}$	джоуль на килограмм - кельвин	J/(kg·K)	Дж/(кг·К)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Поверхностная плотность потока энергии	$M T^{-3}$	ватт на квадратный метр	W/m ²	Вт/м ²	$kg \cdot s^{-3}$
Теплопроводность	$LM T^{-3} \theta^{-1}$	ватт на метр - кельвин	W/(m·K)	Вт/(м·К)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
Молярная внутренняя энергия	$L^2 M T^{-2} N^{-1}$	джоуль на моль	J/mol	Дж/моль	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
Молярная энтропия, молярная теплоемкость	$L^2 M T^{-2} \theta^{-1} N^{-1}$	джоуль на моль - кельвин	J/(mol·K)	Дж/(моль·К)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
Энергетическая сила света (сила излучения)	$L^2 M T^{-3}$	ватт на стерадиан	W/sr	Вт/ср	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot sr^{-1}$
Экспозиционная доза (рентгеновского и гамма-излучения)	$M^{-1} T$	кулон на килограмм	C/kg	Кл/кг	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
Мощность поглощенной дозы	$L^2 T^{-1}$	грэй в секунду	Sy/s	Гр/с	$m^2 \cdot s^{-1}$

Различают кратные и дольные единицы физической величины. Например, единица массы тонны равна 10^3 кг, т.е. кратна килограмму. Кратная единица – это единица физической величины, в целое число раз превышающая системную единицу.

Дольная единица – единица физической величины, значение которой в целое число раз меньше системной единицы. Приставка, объединённая с единицей, означает, что единица умножена на десять в целой степени. Приставки используются, чтобы избежать больших или маленьких числовых значений. Приставки и множители для образования кратных и дольных единиц приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных и их наименований

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

Присоединение к наименованию единицы двух или более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы микромикрофарад следует писать пикофарад.

Примечания:

1. В связи с тем, что наименование основной единицы – килограмм содержит приставку «кило», для образования кратных и дольных единиц массы используется дольная единица грамм (0,001 кг, г), и приставки надо присо-

единять к слову «грамм», например, миллиграмм (mg, мг) вместо микрокилограмм (rgμ, мккг).

2. Дольную единицу массы – «грамм» допускается применять и без присоединения приставки.

Приставку или её обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или соответственно, с её обозначением.

Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку следует присоединять к наименованию первой единицы, входящей в произведение или в отношение.

Правильно:

килопаскаль-секунда на метр
(Pa •ks/m; Па •кс/м)

Неправильно:

паскаль-килосекунда на метр
(kPa •s/т; кПа •с/м)

Допускается применять приставку во втором множителе произведения или в знаменателе лишь в обоснованных случаях, когда такие единицы широко распространены и переход к единицам, образованным в соответствии с первой частью пункта, связан с большими трудностями, например: тонна-километр (tkm; т км), ватт на квадратный сантиметр (W/cm^2 ; $Вт/cm^2$), вольт на сантиметр (V/cm ; $В/см$), ампер на квадратный миллиметр (A/mm^2 ; $А/мм^2$).

Наименования кратных и дольных единиц от единицы, возведённой в степень, следует образовывать путём присоединения приставки к наименованию исходной единицы, например, для образования наименований кратной или дольной единицы от единицы площади – квадратного метра, представляющей собой вторую степень единицы длины – метра, приставку следует присоединять к наименованию этой последней единицы: квадратный километр, квадратный сантиметр и т. д.

Обозначения кратных и дольных единиц от единицы, возведённой в степень, следует образовывать добавлением соответствующего показателя степени к обозначению кратной или дольной от этой единицы, причём показатель означает возведение в степень кратной или дольной единицы (вместе с приставкой).

Примеры:

1. $5 \text{ km}^2 = 5(10^3 \text{ m})^2 = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^2$.

2. $250 \text{ cm}^3/\text{s} = 250(10^{-2} \text{ m})^3 / (1 \text{ s}) = 250 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$.

3. $0,002 \text{ cm}^{-1} = 0,002 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 0,002 \cdot 100 \text{ m}^{-1} = 0,2 \text{ m}^{-1}$.

Рекомендации по выбору десятичных кратных и дольных единиц приведены в справочном Приложении В.

2.2.1. Правила написания обозначений единиц

Для написания значений величин следует применять обозначения единиц буквами или специальными знаками (...°, ...', ..."), причём устанавливаются два вида буквенных обозначений:

- международные (с использованием букв латинского или греческого алфавита);
- русские (с использованием букв русского алфавита).

Устанавливаемые стандартом обозначения единиц приведены в таблицах 1–7.

Международные и русские обозначения относительных и логарифмических единиц следующие: процент (%), промилле (‰), миллионная доля (ppm, млн⁻¹), бел (В. Б), децибел (dB, дБ), октава (–, окт), декада (–, дек), фон (phon, фон).

Буквенные обозначения единиц должны печататься прямым шрифтом. В обозначениях единиц точку как знак сокращения не ставят.

Обозначения единиц следует применять после числовых значений величин и помещать в строку с ними (без переноса на следующую строку).

Между последней цифрой числа и обозначением единицы следует оставлять пробел.

Правильно:
100 kW; 100 кВт
80 %
20 °C

Неправильно:
100кW; 100кВт
80%
20° C; 20°C

Исключения составляют обозначения в виде знака, поднятого над строкой, перед которыми пробела не оставляют.

Правильно:
20°

Неправильно:
20 °

При наличии десятичной дроби в числовом значении величины обозначение единицы следует помещать после всех цифр.

Правильно:

423,06 м; 423,06 м
 5,758 ° или 5°45,48'
 или 5°45'28,8''

Неправильно:

423 м, 0,6; 423м, 06
 5°, 758 или 5045/,48
 или 5°45'28'',8

При указании значений величин с предельными отклонениями следует заключать числовые значения с предельными отклонениями в скобки и обозначения единицы помещать после скобок или про- ставлять обозначения единиц после числового значения величины и после её предельного отклонения.

Правильно:

(100±0,1) кг,
 50 g ±1 g

Неправильно:

100,0±0.1 кг
 50±1 g

Допускается применять обозначения единиц в заголовках граф и в наименованиях строк (боковиках) таблиц.

Примеры:

Номинальный расход м ³ /h	Верхний предел показаний, м ³	Цена деления крайнего правого ролика, м ³ не более
40 и 60	100 000	0,002
100, 160, 250, 400, 600 и 1 000	1 000 000	0,02
2 50, 4 000, 6 000 и 10 000	10 000 000	0,2

Тяговая мощность, kW	18	25	37
Габаритные размеры, мм:			
длина	3 080	3 500	4 090
ширина	1 430	1 685	2 395
высота	2 190	2 745	2 770
Колея, мм	1 090	1 340	1 823
Просвет, мм	275	640	345

Допускается применять обозначения единиц в пояснениях обозначений величин к формулам. Помещение обозначений единиц в одной строке с формулами, выражающими зависимости между величинами или между их числовыми значениями, представленными в буквенной форме, не допускается.

Правильно:

$v=3,6 \text{ s/t}$,
 где v – скорость, км/ч;
 s – путь, м;
 t – время, с

Неправильно:

$v = 3,6s/t \text{ км/ч}$,
 где s – путь в м;
 t – время в с

Буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, следует отделять точками на средней линии, как знаками умножения (в машинописных текстах допускается точку не поднимать).

Правильно:

$N \cdot m$; $H \cdot m$
 $A \cdot m^2$; $A \cdot m^2$
 $Pa \cdot s$; $Pa \cdot c$

Неправильно:

Nm ; Hm
 Am^2 ; Am^2
 $Pa s$; $Pa c$

Допускается буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, отделять пробелами, если это не приводит к недоразумению.

В буквенных обозначениях отношений единиц в качестве знака деления должна применяться только одна черта: косая или горизонтальная. Допускается применять обозначения единиц в виде произведения обозначений единиц, возведённых в степени (положительные и отрицательные) (Если для одной из единиц, входящих в отношение, установлено обозначение в виде отрицательной степени, например, g^{-1} , m^{-1} , K^{-1} ; c^{-1} , m^{-1} , применять косую или горизонтальную черту не допускается).

Правильно:

$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; $Вт \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$; $\frac{Вт}{m^2 \cdot K}$

Неправильно:

$W/m^2 / K$; $Вт/m^2 / K$
 $\frac{W}{m^2}$; $\frac{Вт}{m^2}$
 $\frac{W}{K}$; $\frac{Вт}{K}$

При применении косой черты обозначения единиц в числителе и знаменателе следует помещать в строку, произведение обозначений единиц в знаменателе следует заключать в скобки.

Правильно:

m/s ; m/c
 $W/(m \cdot K)$; $Вт/(m \cdot K)$

Неправильно:

m/s ; m/c
 $W/m \cdot K$; $Вт/m \cdot K$

При указании производной единицы, состоящей из двух и более единиц, не допускается комбинировать буквенные обозначения и наименования единиц, т. е. для одних единиц приводить обозначения, а для других – наименования.

Правильно:
80 км/ч
80 километров в час

Неправильно:
80 км/час
80 км в час

Примечание. Допускается применять сочетания специальных знаков: °, .., ' , ...'', % и ‰ с буквенными обозначениями единиц, например, ... ‰/s и т. д.

2.3. Эталоны основных единиц физических величин и их классификация

В основе обеспечения единства измерений лежит система передачи размера единицы от эталона к применяемым СИ. Воспроизведение, хранение и передачу размеров единиц осуществляют с помощью эталонов. Эталоны являются высшим звеном в метрологической цепи передачи размеров единиц измерений.

Эталон единицы физической величины – это СИ (или комплекс СИ), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи её размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утверждённое в качестве эталона установленным порядком. Конструкция эталона, его характеристики и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать тесно связанными между собой признаками – стабильностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью, называется *первичным*. В системе передачи размеров единиц выделяют исходные эталоны, в качестве которых могут быть и первичные эталоны.

Исходный эталон – эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в данной лаборатории, организации, на предприятии, в данном регионе, в стране), от которого передают размер единицы подчинённым эталонам и имеющимся СИ.

Государственным первичным эталоном (национальным эталоном) – называют первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства. Термин *национальный эталон* применяют в случаях проведения сличения эталонов, принадлежащих отдельным государствам. Исходным эталоном в стране служит первичный эта-

лон, исходным эталоном для республики, региона, министерств (ведомств) или предприятий может быть вторичный или рабочий эталон. Эталоны, стоящие по поверочной схеме ниже исходного, называют подчинёнными эталонами.

На практике некоторые физические величины приходится измерять в различных условиях, сильно отличающихся от обычных. В связи с этим методы, средства и условия поверки СИ, работающих в этих режимах, необходимо учитывать при передаче размеров единиц. Поэтому для воспроизведения таких величин в специальных условиях применяют специальные эталоны.

Специальный эталон – это эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий для этих условий первичный эталон. К специальным эталонам относятся эталоны, применяемые в сфере обороны и безопасности и при производстве оборонной продукции.

Военный эталон единицы величины – эталон, разработанный по заказу Минобороны, признанный в качестве исходного для сферы обороны и безопасности. Военный эталон служит резервом соответствующего государственного эталона и по отношению к нему является вторичным.

В иерархической системе передачи размера единиц по приоритету воспроизведения и хранения единицы эталоны подразделяются на вторичные эталоны сравнения и рабочие.

Вторичный эталон – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы. По своему метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на эталоны сравнения, рабочие эталоны.

Эталоны, как правило, представляют собой достаточно сложные стационарные конструкции. Поэтому с целью периодического сличения воспроизводимой единицы различными эталонами, используют так называемые эталоны сравнения.

Эталон сравнения – эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом. Эти эталоны имеют более простую конструкцию, т.к. от них требуется в основном стабильность их характеристик во время транспортировки.

Рабочий эталон – эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим СИ. Допускается применение первичного этало-

на в качестве рабочего, если это предусмотрено правилами хранения и применения эталона.

Термин «рабочий эталон» заменил собой термин «образцовое средство измерений», который более 200 лет применялся в нашей стране. Это сделано с целью упорядочения терминологии и приближения её к международной. Рабочие эталоны могут подразделяться на разряды (1-й, 2-й, ...n-й), как это было принято для образцовых средств измерений. В этом случае передачу размера единицы осуществляют через цепочку подчинённых по разряду рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке размер единицы передают рабочему СИ.

В зависимости от особенностей физической величины и способов её воспроизведения эталоны могут быть одиночными, групповыми или в виде эталонного набора СИ.

Одиночный эталон – эталон, в составе которого одно СИ (мера, измерительный прибор, эталонная установка) для воспроизведения и (или) хранения единицы. Примером одиночного эталона является вторичный эталон единицы массы – килограмма (кг) в виде платино-иридиевой гири массой 1 кг.

Групповой эталон – эталон в состав, которого входят СИ одного типа, номинального значения или диапазона измерений, применяемых совместно для повышения точности воспроизведения единицы или её хранения. По своему составу групповые эталоны подразделяются на эталоны постоянного или переменного состава. За результат измерений при работе с этими эталонами обычно принимают среднее арифметическое значение результатов измерений однотипными СИ или эталонными установками. Примером такого эталона может служить вторичный эталон единицы электродвижущей силы (электрического напряжения) – вольта (в) в виде группы из 20 насыщенных нормальных элементов.

В тех случаях, когда необходимо охватить некоторую расширенную область значений физической величины, создаются эталонные наборы совокупности СИ этой величины.

Эталонный набор – эталон, состоящий из совокупности СИ, позволяющий воспроизводить и (или) хранить единицу в диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств. Например, эталонный набор представляют эталонные разновесы (наборы эталонных гирь) и эталонные наборы ареометров.

Эталон (иногда специальной конструкции), предназначенный для его транспортирования к местам поверки (калибровки) СИ или сличения эталонов данной единицы, называют *транспортным эталоном*.

Рабочие эталоны поверяют, как правило, с помощью поверочной установки высшей точности – эталонной установки, которая создаётся в метрологических институтах или на предприятиях Госстандарта России.

Эталонная установка – измерительная установка, входящая в состав эталона, например, в состав эталона активности радионуклидов входит шесть эталонных установок.

Число эталонов не является постоянным, а изменяется в зависимости от потребностей экономики и обороноспособности страны. В настоящее время наблюдается тенденция увеличения их числа, что обусловлено постоянным развитием рабочих СИ. Совокупность государственных первичных и вторичных эталонов образует эталонную базу страны.

Эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами, называют *международными эталонами*. Международные эталоны хранятся в Международном Бюро мер и весов в г. Париже.

Перечень государственных первичных эталонов основных физических величин, а также комплекс основных СИ, входящих в эталон и их основные МХ, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Комплекс основных СИ, входящих в эталон и их основные метрологические характеристики

Наименование и размерность физической величины	Наименование и обозначение единицы физической величины	Комплекс основных средств измерений, входящих в эталон	Номинальное значение или диапазон значений	Среднеквадратическое отклонение результата измерений	Не исключённая систематическая погрешность
Длина	метр (м)	Первичные Источник первичного эталонного излучения криптона-86 – газоразрядная	0 – 1 м	$S_0 = 5 \cdot 10^{-9}$	-

		лампа с изотопом криптона-86. Эталонный интерферометр №2 с фотоэлектрическим микроскопом и рефрактором. Эталонный спектроинтерферометр №01			
Масса	килограмм (кг)	Копии международного прототипа килограмма – платино-иридиевая гиря №12 массой 1 кг. Эталонные весы №1 (типа Рупрехта). Эталонные весы №2 (типа ВНИИМ)	1 кг	$S_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ мг	-
Сила электрического тока	Ампер (А)	Токовые весы. Средства воспроизведения единицы ЭДС – вольты по единице силы тока и единице электрического сопротивления	1, 018646 А	$S_0 = 4 \cdot 10^{-6}$	$\Theta_0 = 8 \cdot 10^{-6}$
Термодинамическая температура	Кельвин (К)	Платиновые термометры сопротивления Аппаратура для воспроизведения реперных точек МПТШ-06. Высокотемпературные термометры сопротивления для точек затвердевания серебра и золота.	13,81-273,15 К	$S_0 = 0,001$ К	$\Theta_0 = 0,003$ К

		<p>Аппаратура для воспроизведения реперных точек – тройной точки воды, точки кипения воды, точек затвердевания олова, цинка, серебра, олова.</p> <p>Температурные лампы для точки затвердевания золота.</p> <p>Фотоэлектрическая и электроизмерительная аппаратура</p>	<p>$S_0 = 0,001$ К</p> <p>$S_0 = 0,001$ К</p>	<p>$\Theta_0 = 0,003$ К</p> <p>$\Theta_0 = 0,005$ К</p>	
Сила света	кандела (кд)	<p>Полные излучатели (2 шт.) с обозначениями 1 ба и 1 бв при температуре затвердевания платины.</p> <p>Оптические устройства для фокусировки изображения светящегося отверстия излучателя.</p> <p>Установка со зрительным и фотоэлектрическим фотометром для передачи размера единицы вторичным эталонам</p>	120-200 кд	$S_0 = 2 \cdot 10^{-3}$	$\Theta_0 = 6 \cdot 10^{-3}$

3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Принципы, методы измерений и их классификация

Под измерением понимают совокупность операций по применению технического устройства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с её единицей и получение значения этой величины.

При измерении физическая величина сравнивается с определённым её значением, принятым за единицу. Значение физической величины, полученное в итоге измерения, называют результатом измерения, который представляет собой, как правило, именованное число, т. е. числовое значение измеряемой величины и наименование единицы измерения.

По способу получения результата все измерения подразделяются на следующие виды: прямые, косвенные, совместные и совокупные.

Прямыми называют измерения, при которых искомое значение физической величины находят непосредственно. Это вид измерений является наиболее распространённым. Примерами прямых измерений могут служить измерения линейных размеров линейкой, силы тока амперметром, диаметра вала штангенциркулем и т.д.

Суть *косвенных* измерений заключается в том, что их результат находят на основании известной зависимости между измеряемой величиной и величинами – аргументами, полученными при прямых измерениях. Математически их можно описать уравнением:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где y – искомое значение величины, являющееся функцией аргументов; x_1, x_2, \dots, x_n – результаты прямых измерений.

Косвенные измерения широко применяют, когда физическую величину измерить непосредственно невозможно из-за отсутствия СИ или сложности метода измерения.

Совместными называют измерения, производимые одновременно двух или нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними. Примером совместных измерений может

служить нахождение функциональной зависимости электрической ёмкости варикапа от приложенного к нему напряжения.

Совокупными называют измерения, проводимые одновременно нескольких одноимённых величин, при которых искомые значения величин находят решением уравнений, получаемых при прямых измерениях в различных сочетаниях.

Примером совокупных измерений может служить измерение проводимости нескольких проводников по результатам измерения проводимости каждого из них в отдельности при параллельном их соединении.

По точности, т.е. по степени приближения результата измерений к истинному значению измеряемой величины, измерения условно делятся на три группы.

1. Измерения с максимально возможной точностью (высокоточные измерения), достижимой при существующем уровне науки и техники. Как правило, это измерения, связанные с эталонами.

2. Контрольно-поверочные измерения, погрешность которых не должна быть больше некоторых заданных значений. К ним относятся измерения, выполняемые в метрологических поверочных органах.

3. Технические измерения, в которых погрешность результата определяется точностью применяемых СИ. Примером технических измерений может служить измерительный контроль электрических параметров энергетических установок.

Под принципом измерений понимают физическое явление или эффект, положенное в основу измерений. В соответствии с этим все методы измерений подразделяются на методы сравнения и методы непосредственной оценки.

Совокупность применяемых принципов и технических средств, имеющих нормированные метрологические характеристики, для сравнения измеряемой величины с единицей измерения составляет суть метода измерения. При прямых измерениях применяют следующие основные методы: непосредственной оценки, сравнения с мерой, дифференциальный, нулевой и метод совпадения.

Метод непосредственной оценки – это метод измерений, при котором значение измеряемой величины определяется непосредственно по показанию СИ. Примерами могут служить измерения с помощью показывающих стрелочных СИ.

Метод сравнения с мерой – это метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Например, измерение массы с помощью рычажных весов посредством гирь.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, несколько отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Примером этого метода является измерение напряжения путём определения разности между измеряемым значением и ЭДС нормального элемента.

Нулевой метод измерений – является частным случаем дифференциального, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Характерным примером нулевого метода является измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием.

Метод совпадения, это метод в котором разность между измеряемой величиной и известной величиной (мерой) измеряют, используя совпадение отметок шкал или изображений фигур. Например, по сравнению фигур Лиссажу с помощью осциллографа измеряют частоту сигнала.

По отношению к объекту измерений различают контактный и бесконтактный методы измерений.

Контактный метод измерения – метод, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерений. Примером таких измерений может служить измерение температуры тела человека медицинским термометром.

Бесконтактный метод измерения – метод, основанный на том, что чувствительный элемент СИ не приводится в контакт с объектом измерения. Например, измерение расстояния до объекта радиолокатором.

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

Динамическое измерение – измерение изменяющейся по размеру физической величины или её изменения во времени (если необходимо). Динамическое измерение производят с точной фиксацией момента времени.

Статическими являются, например, измерение массы и линейных размеров твердых тел; *динамическими* – являются измерения, например, расхода жидкости и газа. В зависимости от режимов измерения различают статические и динамические погрешности.

Способность СИ реагировать на изменяющуюся измеряемую величину отражает его динамические свойства. Динамические свойства оцениваются с помощью динамических характеристик, которые относятся к метрологическим характеристикам СИ, т.к. динамические свойства влияют на погрешности и результат измерений.

По количеству измерительной информации измерения разделяются на однократные и многократные.

Однократное измерение – это измерение, выполненное один раз. Во многих случаях на практике выполняются именно однократные измерения. Например, измерение конкретного интервала времени по часам обычно производится один раз.

Многократное измерение – это 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, как правило, проводят с целью уменьшения влияния случайных составляющих погрешностей измерения.

По способу выражения результата измерения делят на абсолютные и относительные.

Абсолютное измерение – это измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Примером таких измерений может служить измерение силы, основанное на измерении основной величины – массы и использовании константы – ускорения свободного падения.

Относительное измерение – это измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную. Примером таких измерений может служить измерение активности радионуклида в однотипном источнике, принятом в качестве эталонной меры активности.

Следует отметить, что наиболее распространенной в практической метрологии, в т.ч. при производстве оборонной продукции, яв-

ляется классификация измерений в зависимости от измеряемой физической величины.

Данная классификация отвечает следующим требованиям:

- включает применяемые в стране физические величины;
- не допускает возможности включения одной и той же измеряемой физической величины в различные виды измерений;
- однозначно определяет принадлежность измеряемой физической величины к тому или иному виду измерений;
- обеспечивает возможность обработки на ЭВМ измерительной информации о материальных объектах (документации, эталонах, средствах измерений, другой продукции и т.д.).

В настоящее время принята следующая классификация видов измерений:

- измерения геометрических величин;
- измерения механических величин;
- измерения параметров потока, расхода, уровня, объема веществ;
- измерения давления, вакуумные измерения;
- измерения физико-химического состава и свойств веществ;
- теплофизические и температурные измерения;
- измерения времени и частоты;
- измерения электрических и магнитных величин, радиотехнические и радиоэлектронные измерения;
- измерения акустических величин;
- оптико-физические измерения;
- измерения характеристик ионизирующих излучений и ядерных констант.

При этом в случае необходимости в нормативно-методических документах и справочно-информационных изданиях может быть приведена классификация групп (областей) по физическим величинам для каждого вида измерений. Например, в Справочнике технических и эксплуатационных характеристик средств измерения военного назначения.

Средства измерения также практически целесообразно классифицировать по признаку измеряемой физической величины.

3.2. Качество измерений. Погрешности измерений и их классификация

3.2.1. Показатели качества измерений

Качество измерений – это совокупность свойств, обуславливающих соответствие СИ, методов и методик измерений требованиям обеспечения точности, достоверности, единства измерений. Обеспечение качества измерений параметров оборонной продукции составляет единую систему метрологического обеспечения, включающую выбор критерия оптимизации для определения оптимального состава контролируемых параметров, допускаемых значений, характеристик точности и достоверности измерений, оптимального состава привлекаемых СИ, и их единообразия, оперативности измерений и контроля.

Качество измерений характеризуется следующими основными показателями: точностью (правильностью и прецизионностью), условиями повторяемости и воспроизводимости, достоверностью, а также принятым методом измерений.

Точность измерений – это степень близости результата измерений к принятому опорному значению.

Следует отметить, что в отечественной метрологии точность и погрешность результатов измерений обычно определяется сравнением результата измерений $X_{\text{изм}}$ с истинным или действительным значением измеряемой величины $X_{\text{н}}$ ($X_{\text{д}}$). При этом фактически $X_{\text{н}}$ ($X_{\text{д}}$) являются эталонными значениями измеряемых величин, выраженных в законных единицах.

Однако в условиях отсутствия эталонов, необходимых для оценки погрешности (точности) результатов измерений, в метрологической практике за действительное значение, как правило, принимают общее среднее значение (математическое ожидание) совокупности результатов измерений. Поэтому эта ситуация отражена в термине «принятое опорное значение», которое рекомендуется использовать в отечественной практике.

Принятое опорное значение – значение, которое служит в качестве согласованного для сравнения и представляет собой:

- теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;

- приписанное или аттестованное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо национальной или международной организации;
- согласованное или аттестованное значение, базирующееся на совместных экспериментальных работах под руководством научной и инженерной группы;
- математическое ожидание (общее среднее значение) заданной совокупности результатов измерений в условиях отсутствия необходимых эталонов, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу соответствующих значений единиц измеряемых величин – истинных или действительных величин, выраженных в узаконенных единицах.

Условно истинное (действительное) значение физической величины понимается как эталонное.

В отечественных нормативных документах по метрологии термины «правильность» и «прецизионность» ранее не использовались.

Правильность – степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений, к принятому опорному значению. Показателем правильности является значение систематической погрешности. С методической точки зрения правильность можно трактовать как «точность среднего значения».

Прецизионность – степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. В рамках практической метрологии термин «прецизионность» фактически характеризует стабильность получаемых результатов измерений. Прецизионность зависит только от случайных погрешностей и не имеет отношения к истинному (опорному) значению измеряемой величины. Меру прецизионности обычно выражают как среднеквадратическое отклонение результатов измерений. Как следует из определения, количественные значения мер неопределённости зависят от регламентированных условий выполнения измерений. Крайними случаями таких условий являются условия повторяемости и условия воспроизводимости.

Условия повторяемости – условия, при которых независимые результаты измерений получаются одним и тем же методом на идентичных объектах, в одной и той же лаборатории, одним и тем же оператором, с использованием одного и того же оборудования, в преде-

лах короткого промежутка времени. Фактически условия повторяемости являются условиями полного копирования.

Независимые результаты измерений – результаты, полученные способом, на который не оказывает влияния предшествующий результат, полученный при измерениях того же самого объекта.

Повторяемость (сходимость) – прецизионность в условиях повторяемости. Это показатель качества измерений, отражающий близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях. Повторяемость измерений отражает влияние случайных погрешностей.

Условия воспроизводимости – условия, при которых результаты измерений получают одним и тем же методом, на идентичных объектах, но в различных лабораториях, разными операторами, с использованием различного оборудования.

Воспроизводимость – прецизионность в условиях воспроизводимости. Это показатель качества измерений, который отражает близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в различное время, в различных местах, разными методами и средствами).

Достоверность измерений характеризует степень доверия к результатам измерений. Достоверности оценки погрешностей определяют на основе систематической статистики и законов теории вероятностей.

3.2.2. Классификация погрешностей измерений

Результаты любого измерения даже при тщательном его выполнении не дают истинного значения измеряемой величины, т.к. каждое измерение сопровождается погрешностью. Как отметил профессор В.А. Кузнецов [8], истинное значение величины с философской точки зрения сопоставляется абсолютной истине, т.е. оно может быть определено только в результате бесконечного процесса измерений с соответствующим бесконечным процессом совершенствования применяемых методов и СИ.

Погрешность результата измерений (погрешность измерений) – это отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. На практике используют действительное (опорное) значение величины X_d ($X_{оп}$) в результате чего погрешность измерения Δ определяют по формуле

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X_{\text{д}} (X_{\text{оп}}), \quad (3.1)$$

где $X_{\text{изм}}$ – результат измерения.

Следует отметить, что абсолютно точно погрешность определить невозможно. Погрешность измерений представляет собой сумму целого ряда составляющих, каждая из которых имеет свою причину и значение.

Классификационные признаки, по которым общую погрешность разделяют на составляющие, могут быть разные. Наибольшее распространение в отечественной метрологии нашли следующие признаки классификации погрешностей:

- форма представления;
- закономерность появления;
- причина возникновения;
- зависимость от измеряемой величины X .

В зависимости от формы представления различают абсолютную, относительную и приведённую погрешности измерений.

Абсолютная погрешность Δ измерений – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины. Абсолютная погрешность определяется по формуле (3.1)

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X_{\text{д}} (X_{\text{оп}}).$$

Однако абсолютная погрешность не всегда даёт представление о точности измерений. Например, измерение дальности до спутника Земли с абсолютной погрешностью 0,5 м можно признать довольно точным, а измерение роста человека с той же погрешностью является грубым. Поэтому точность измерений часто характеризуют относительной погрешностью.

Относительная погрешность измерений (δ) – погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному (опорному) или измеренному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{д}}(X_{\text{оп}})}, \text{ или } \delta = \frac{\Delta}{X_{\text{изм}}}. \quad (3.2)$$

Часто относительную погрешность выражают в процентах. В последнем случае относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{д}}(X_{\text{оп}})} * 100\%, \quad \text{или} \quad \delta = \frac{\Delta}{X_{\text{изм}}} * 100\%. \quad (3.3)$$

Для характеристики точности измерительных приборов применяют приведённую погрешность.

Приведенная погрешность γ – отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению $X_{\text{н}}$:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_{\text{н}}}. \quad (3.4)$$

Нормирующее значение $X_{\text{н}}$ принимается в зависимости от типа измерительного прибора. В наиболее распространенном случае $X_{\text{н}}$ принимается равным верхнему пределу измерений, когда нижний предел – нулевое значение односторонней шкалы прибора.

По закономерности появления погрешности измерения разделяют на систематические и случайные.

Систематическая погрешность измерения – это составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющейся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют на *постоянные, прогрессивные, периодические и погрешности, изменяющиеся по сложному закону*.

Постоянные погрешности – погрешности, которые длительное время сохраняют своё значение, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто.

Прогрессивные погрешности – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле её прибором активного контроля.

Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

Систематические погрешности могут вызываться конструктивными недостатками СИ, недостаточно точным исполнением методики из-

мерений. Если систематическая погрешность постоянна для конкретного экземпляра СИ, то для большого числа серийных СИ данного типа эта погрешность может более или менее отличаться случайным образом. Поэтому в общем случае систематическая погрешность большой совокупности СИ данного типа обычно рассматривается как случайная. По определению систематическая погрешность – это математическое ожидание случайной величины – общей (суммарной) погрешности измерений. Систематическая погрешность является результатом действия факторов, которые проявляют себя в каждом измерении одинаково. Зная эти факторы и их функциональную связь с погрешностью измерения, можно до процесса выполнения измерений спрогнозировать результат и уменьшить погрешность путём введения поправки.

Поправка – это значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности.

Для закономерного изменяющихся систематических погрешностей могут быть введены поправочные множители при обработке результатов измерений. Поправочный множитель – это числовой коэффициент, на который умножают неисправленный результат измерения с целью исключения влияния систематической погрешности. Поправочный множитель используют в случаях, когда систематическая погрешность пропорциональна значению величины.

Случайная погрешность измерения – это составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведённых с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины. По определению случайная погрешность представляет собой центрированную случайную величину.

Случайная погрешность возникает при одновременном воздействии многих факторов, каждый из которых сам по себе, как правило, оказывает незаметное влияние на результат измерений, но суммарное воздействие всех факторов может оказаться значительным. Случайная погрешность подчиняется статистическим законам, что позволяет выбрать способы их оценки, т.е. некоторые неслучайные их характеристики, которые используются для прогноза результата измерений. Близость к нулю случайных погрешностей характеризуется прецизионностью в условиях повторяемости (сходимости) измерений.

К случайным погрешностям в большинстве случаев относятся промахи (грубые погрешности).

Промах (грубая погрешность) – это погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Источником промаха могут быть внезапные изменения условий измерения или перемещающиеся отказы (сбои) СИ. Результаты измерений, содержащие грубые погрешности, не должны учитываться при обработке результатов измерений.

По причине возникновения погрешности классифицируются на методические, инструментальные и субъективные (личностные).

Погрешность метода измерений (методическая погрешность) – это составляющая систематической погрешности, обусловленная несовершенством принятого метода измерений. Методическую погрешность иногда называют теоретической погрешностью. К методическим погрешностям относятся составляющие погрешности, обусловленные невозможностью точного воспроизведения модели объекта измерений. К этим составляющим также относятся погрешности, обусловленные недостатками реализованного в конструкции СИ метода измерений, в т.ч. принятых функциональных зависимостей. В ряде случаев погрешность метода может проявляться как случайная. Анализ методических погрешностей требует проведение специальных метрологических исследований при разработке СИ и экспертизе методик выполнения измерений.

Инструментальная погрешность измерения – это составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого СИ. Эти составляющие погрешности определяются несовершенством СИ, его конструктивно-технологическими особенностями, влиянием воздействующих факторов. Следует отметить, что в настоящее время в процессе градуировки, испытаний и поверке СИ инструментальная погрешность может быть достаточно полно определена. Вместе с тем различие между инструментальными погрешностями и методическими не всегда очевидно, что требует тщательного анализа для прогнозирования и оценки, результирующей погрешности измерения.

Субъективная (личная) погрешность измерения – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора. При измерениях встречаются операторы, которые систематически опаздывают или опережают

снимать отчёты показаний приборов. Некоторые операторы вследствие плохого зрения и других индивидуальных особенностей непреднамеренно вносят ошибки в результат измерения. Для устранения этих составляющих погрешности используют автоматизированные СИ.

По зависимости погрешности от измеряемой величины X составляющие погрешности от значения входного сигнала разделяют на аддитивные и мультипликативные.

Аддитивная погрешность измерений – это составляющая погрешности, имеющая постоянную величину, не зависящую от X . Это понятие применимо как к случайным, так и к систематическим погрешностям.

Например, погрешность от постороннего груза на чашке весов, от неточной установки прибора на нулевую отметку перед измерением являются аддитивными погрешностями.

Мультипликативная погрешность измерений – это составляющая погрешности, линейно возрастающая или убывающая с ростом измеряемой величины X . Причинами возникновения мультипликативных погрешностей могут быть изменение жесткости мембраны датчика манометра, усталость причины прибора, изменение коэффициента усиления усилителя и др.

3.3. Функции и законы распределения погрешностей

При выполнении измерений случайные $\Delta_{сл}$ и систематические Δ_c погрешности проявляются одновременно, поэтому погрешность измерения в общем случае является случайной величиной:

$$\Delta = \Delta_{сл} + \Delta_c. \quad (3.5)$$

В теории измерений для описания распределения результатов измерений наиболее часто используют интегральные и дифференциальные функции распределения (рис. 1).

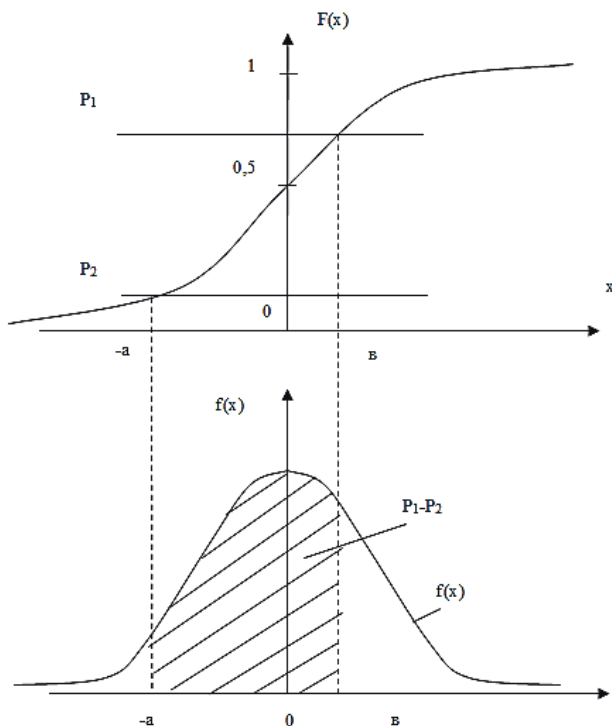


Рисунок 1 – Функция распределения $F(x)$ и плотность распределения $f(x)$ вероятности непрерывной случайной величины

Интегральная функция распределения $F(x)$ определяется как вероятность того, что случайная величина результата измерения $X_{из}$ в i -ом измерении оказывается меньше некоторого текущего значения x , т.е.

$$F(x) = P(X_{из} \leq x). \quad (3.6)$$

Производная этой функции называется плотностью распределения $f(x)$ – дифференциальной функцией распределения или законом распределения случайной величины:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (3.7)$$

Для непрерывных случайных величин функция распределения представляет собой неубывающую функцию.

Если известен закон распределения случайной величины, то можно определить её основные числовые характеристики – математическое ожидание $M[x]$ и дисперсии $D[x]$:

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, \quad (3.8)$$

$$D(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \{x - M(x)\}^2 f(x)dx. \quad (3.9)$$

На практике погрешность Δ рассматривают как случайную величину, принимающую различные значения Δ_i . Её интегральную функцию распределения получают центрированием путём переноса начала координат в точку:

$$X = X_d(X_{оп}),$$

$$F(\Delta) = P[X_{из} - X_d(X_{оп}) \leq X - X_d(X_{оп})] = P(X_{из} \leq X). \quad (3.10)$$

Соответственно плотность распределения погрешности измерения $f(\Delta)$:

$$f(\Delta) = \frac{dF(\Delta)}{d\Delta}. \quad (3.11)$$

В соответствии с теорией вероятностей, полагая $F(+\infty)=1$, получают:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta)d\Delta = 1. \quad (3.12)$$

Это означает, что площадь, заключённая между кривой дифференциального закона распределения погрешности и осью абсцисс, равна единице. Закон распределения может задаваться в виде графика, таблицы, формулы. Законы распределения устанавливают теоретически или экспериментально.

Экспериментально закон распределения случайных погрешностей может быть определён следующим образом [4]. Предположим, что при измерениях было проведено n наблюдений, для каждого из которых были определены погрешности:

$$\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n,$$

а также было установлено, что малые погрешности встречаются чаще больших.

Определим число N_1 наблюдений с положительными погрешностями, значения которых находятся в диапазоне от 0 до Δ_1 , затем число N_1^1 наблюдений с отрицательными погрешностями, значения которых лежат в интервале от 0 до $-\Delta_1$. После этого определим числа N_2 и N_2^1 наблюдений с положительными и отрицательными погрешностями, значения которых лежат в интервалах от Δ_1 до Δ_2 и от $-\Delta_1$ до $-\Delta_2$ соответственно и т.д.

Вычислим частоты появления этих погрешностей:

$$\begin{aligned} P^*(N_1) &= \frac{N_1}{n}; & P^*(N_1^1) &= \frac{N_1^1}{n}; & P^*(N_2) &= \frac{N_2}{n}; \\ P^*(N_2^1) &= \frac{N_2^1}{n}; \dots P^*(N_m) &= \frac{N_m}{n}; & P^*(N_m^1) &= \frac{N_m^1}{n}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

где $m < n$.

Так как в нашем случае было установлено, что малые погрешности встречаются чаще, чем большие, то очевидно, что при этом будут иметь место следующие неравенства:

$$N_1 > N_2 > \dots > N_m \text{ и } N_1^1 > N_2^1 > \dots > N_m^1,$$

а также

$$P^*(N_1) > P^*(N_2) > \dots > P^*(N_m) \text{ и } P^*(N_1^1) > P^*(N_2^1) > \dots > P^*(N_m^1).$$

Посмотрим ступенчатый график (гистограмму), по горизонтальной оси которого отложим интервалы выборки случайных погрешностей Δ , а по вертикальной – плоскости частот появления погрешностей в этих интервалах:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{P^*(N_1)}{n}; & y_1 &= \frac{P^*(N_1^1)}{n}; & y_2 &= \frac{P^*(N_2)}{n}; & y_2 &= \frac{P^*(N_2^1)}{n}; \\ \dots & y_m &= \frac{P^*(N_m)}{n}; & y_m &= \frac{P^*(N_m^1)}{n}; \end{aligned} \quad (3.14)$$

Если число измерений увеличивать, а интервал выборки погрешностей Δ уменьшать, то ломаная линия (рис. 2а) превратится в плавную линию (рис. 2б), симметричную относительно вертикальной оси.

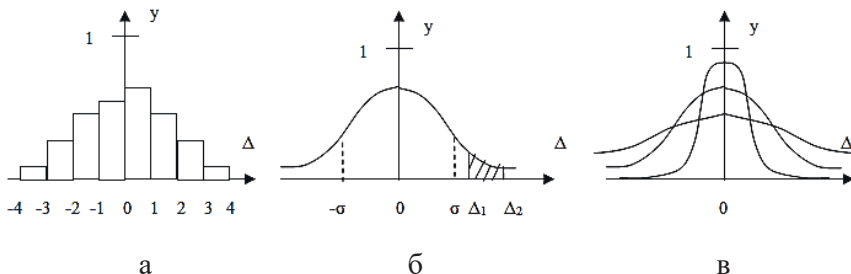


Рисунок 2 – Графики нормального закона распределения случайных погрешностей:

а – гистограмма; б – кривая нормального распределения случайных погрешностей; в – зависимость кривых нормального распределения погрешностей от среднего квадратического отклонения

Этот график выражает закон нормального распределения случайных погрешностей и математически описывается уравнением плотности вероятностей:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.15)$$

где σ – среднее квадратическое значение случайных погрешностей измерения;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}}. \quad (3.16)$$

В теории вероятностей мерой рассеяния случайных величин является дисперсия:

$$D(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 y d\Delta = \sigma^2, \quad (3.17)$$

поэтому среднее квадратическое значение случайных погрешностей:

$$\sigma = \sqrt{D(\Delta)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}}. \quad (3.18)$$

Точки перегиба линии на рисунке 2б имеют место при $\Delta = \pm\sigma$. Диапазон от $-\sigma$ до σ соответствует области часто встречающихся погрешностей; зоны же слева и справа от $\pm\sigma$, где $|\Delta| > |\sigma|$, составляют области редко встречающихся погрешностей. При $\Delta = 0$ кривая у имеет максимум:

$$y_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}. \quad (3.19)$$

Из последнего выражения видно, что с уменьшением σ максимум y_m увеличивается и область часто встречающихся погрешностей сужается. Это иллюстрируется на рисунке 2в, где кривые 1, 2 и 3 соответствуют средним квадратическим отклонениям $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$. Таким образом, средняя квадратическая погрешность σ характеризует «расплывчатость» формы графика распределения, или рассеяние случайных погрешностей.

Практика измерений показывает, что случайные погрешности чаще всего подчиняются закону нормального распределения, реже – закону равномерного распределения, и ещё реже – показательному или другим законам.

Закон равномерного распределения характеризуется равной вероятностью появления разных случайных погрешностей. График этого закона для случайных погрешностей, не превосходящих интервала с границами $\pm\Theta$, представлен на рисунке 3.

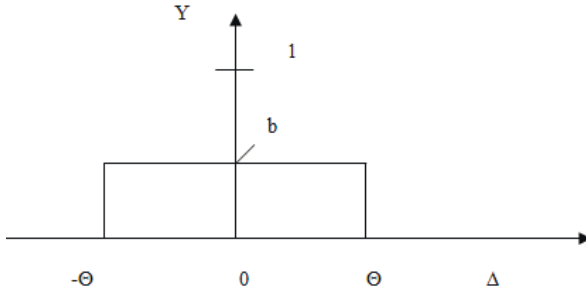


Рисунок 3 – График закона равномерного распределения случайных погрешностей

Математически закон равномерного распределения записывается следующим образом:

$$y = \begin{cases} 0; & -\infty < \Delta < -\Theta; \\ b; & -\Theta < \Delta < \Theta; \\ 0; & \Theta < \Delta < \infty. \end{cases} \quad (3.20)$$

т.е. плотность вероятностей появления случайных погрешностей в диапазоне от $-\Theta$ до Θ постоянна и равна b , а вне – равна 0.

Значение вероятности $y = b$ находят из условия, что вероятность появления погрешности в интервале от $-\Theta$ до Θ , как достоверное событие, равна 1, т.е.

$$P(-\Theta < \Delta < \Theta) = \int_{-\Theta}^{\Theta} y d\Delta = \int_{-\Theta}^{\Theta} b d\Delta = 2\Theta b = 1, \quad (3.21)$$

откуда

$$b = 1/2\Theta. \quad (3.22)$$

Среднее квадратическое значение случайных погрешностей закона равномерного распределения

$$\sigma = \sqrt{D(\Delta)} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 y d\Delta} = \sqrt{\int_{-\Theta}^{\Theta} \Delta^2 \frac{1}{2\Theta} d\Delta} = \sqrt{\frac{1}{2\Theta} \cdot \frac{2\Theta^3}{3}} = \frac{\Theta}{\sqrt{3}}. \quad (3.23)$$

4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ

4.1. Классификация средств измерений

Проведение измерений, т.е. нахождение значений одной или нескольких физических величин опытным путём, осуществляется с помощью специальных технических средств.

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. Их многообразие классифицируют по ряду признаков.

По роли, выполняемой в процессе измерений, СИ подразделяют на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы и стандартные образцы.

Измерительные приборы по своему устройству подразделяются на следующие основные виды: аналоговые, цифровые, прямого действия, сравнения, интегрирующие, суммирующие.

Аналоговый прибор – это измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Цифровой прибор – это измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, представляемой в цифровой форме.

Приборы прямого действия – это измерительные приборы, в которых преобразование сигнала измерительной информации осуществляется в одном направлении.

Прибор сравнения – это измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения цифровой величины, значение которой известно.

Интегрирующий прибор – это измерительный прибор, в котором измеряемая величина подвергается интегрированию по независимой переменной.

Суммирующий прибор – это измерительный прибор, показания которого функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к нему по нескольким каналам.

Самопишущий прибор – это измерительный прибор, в котором предусмотрена запись показаний.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Различают следующие разновидности мер:

однозначная мера – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гиря 1 кг.);

многозначная мера – мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);

набор мер – комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);

магазин мер – набор мер, конструктивно объединённых в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических соединений).

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Измерительная установка – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

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

Измерительная система – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещённых в разных точках контролируемого объекта и т. п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на *измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие* и др.

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

Стандартный образец – образец вещества (материала) с установленными в результате метрологической аттестации значениями одной или более величин, характеризующими свойство или состав этого вещества (материала).

Различают *стандартные образцы свойства и стандартные образцы состава*.

Стандартные образцы свойств веществ и материалов по метрологическому назначению выполняют роль однозначных мер. Они могут применяться в качестве рабочих эталонов (с присвоением разряда по государственной поверочной схеме).

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, СИ классифицируются на средства поверки и рабочие средства измерений.

Средства поверки – это эталоны, поверочные установки и другие СИ, применяемые при поверке в соответствии с установленными правилами.

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

По измеряемой величине подразделяются на СИ электрических и неэлектрических величин.

В свою очередь эти подгруппы классифицируются по принципу действия СИ. Так, обширную группу СИ, предназначенных для измерений электрических величин, составляют электронные средства измерений. В свою очередь электронные СИ по признакам основной выполняемой функции подразделяются на подгруппы и виды, которым присваиваются буквенные и буквенно-цифровые обозначения, приведенные в п. 4.2.

Электронные СИ каждого вида по совокупности технических характеристик и очередности разработок делят на типы, которым присваивают наименования и обозначения. Обозначение типа прибора состоит из обозначения вида, к которому СИ относится, и порядкового номера, разделённых дефисом. Порядковый номер присваивает головное предприятие-разработчика СИ.

Приборы, используемые при измерениях электрических величин, можно разделить на две группы: электроизмерительные и радиоизмерительные.

Электроизмерительные приборы применяются для измерений на постоянном токе и, как правило, в области низких частот (20–2500 Гц) токов, напряжений, электрических мощностей, частоты, фазовых сдвигов, сопротивлений, ёмкостей и других величин, характеризующих режим работы электрических цепей и параметр их элементов. В большинстве своем приборы этой группы являются *электромеханическими*, хотя некоторые из них и содержат электронные компоненты. Наряду с ними все большее применение получают полностью автоматизированные приборы с цифровым отсчётом.

Обозначение большинства электроизмерительных приборов состоит из буквы, характеризующей принцип действия, и числа, определяющего вид и тип прибора. К обозначению иногда добавляются буквы *М* (модернизированный), *К* (контактный) и др., отмечающие конструктивные особенности или модификации приборов. По *принципу действия* электроизмерительные приборы разделяются на следующие подгруппы: *М* – магнитоэлектрические; *Э* – электромагнитные; *Д* – электродинамические, ферродинамические; *И* – индукционные; *С* – электростатические; *Н* – самопишущие; *Т* – термоэлектрические; *Ф* – электронные, фотоэлектронные, фотокомпенсационные, цифровые; *Ц* – выпрямительные и комбинированные. К подгруппе *Р* относятся меры и измерительные преобразователи, а также приборы, измеряющие параметры элементов электрических цепей (потенциометры постоянного и переменного тока, измерительные мосты, омметры, микрофарадометры и др.).

Радиоизмерительные приборы применяются для измерения разнообразных электрических и радиотехнических величин как на постоянном токе, так и в широкой полосе низких, высоких и сверхвысоких частот, а также для наблюдения и исследования формы радиосигналов и характеристик радиоэлектронных устройств, генерирова-

ния испытательных сигналов. В большинстве своем они являются *электронными* приборами, поскольку действие их базируется на свойствах электровакуумных, полупроводниковых и других элементов. Классификация и система обозначений радиоизмерительных приборов приведены в приложении.

Электро- и радиоизмерительные приборы получают *наименование* в соответствии с видом, родом и предельным значением измеряемых величин. Например, приборы для измерения напряжения переменного тока в зависимости от пределов измерений называют микровольтметрами, милливольтметрами, вольтметрами или киловольтметрами переменного тока.

4.2. Классификация радиоизмерительных приборов

А. Приборы для измерения силы тока. А1 – установки для проверки амперметров; А2 – амперметры постоянного тока; А3 – амперметры переменного тока; А7 – амперметры универсальные; А9 – преобразователи тока.

В. Приборы для измерения напряжения. В1 – установки для проверки вольтметров; В2 – вольтметры постоянного тока; В3 – вольтметры переменного тока; В4 – вольтметры импульсного тока; В5 – вольтметры фазочувствительные (векторметры); В6 – вольтметры селективные; В7 – вольтметры универсальные; В8 – измерители отношения напряжений и (или) разности напряжений; В9 – преобразователи напряжений.

М. Приборы для измерения мощности. М1 – установки для проверки ваттметров; М2 – ваттметры проходящей мощности; М3 – ваттметры поглощаемой мощности; М5 – преобразователи приёмные (головки) ваттметров.

Г. Генераторы измерительные. Г1 – установки для проверки; Г2 – генераторы шумовых сигналов; Г3 – генераторы сигналов низкочастотные; Г4 – генераторы сигналов высокочастотные; Г5 – генераторы импульсов; Г6 – генераторы сигналов специальной формы; Г8 – генераторы качающейся частоты.

У. Усилители измерительные. У2 – усилители напряжения постоянного тока; У3 – усилители низкочастотные; У4 – усилители высокочастотные; У5 – усилители селективные; У7 – усилители универсальные.

П. Приборы для измерения напряженности поля и радиопомех. П1 – установки для поверки; П2 – индикаторы поля; П3 – измерители напряженности поля; П4 – измерители радиопомех; П5 – приёмники измерительные; П6 – антенны измерительные; П7 – измерители параметров антенн.

С. Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра. С1 – осциллографы универсальные; С2 – измерители коэффициента амплитудной модуляции (модулетры); С3 – измерители девиации частоты (девиометры); С4 – анализаторы спектра; С6' – измерители нелинейных искажений; С7 – осциллографы скоростные, стробоскопические; С8 – осциллографы запоминающие; С9 – осциллографы специальные.

Х. Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств. Х1 – приборы для исследования амплитудно-частотных характеристик; Х2 – приборы для исследования переходных характеристик; Х3 – приборы для исследования фазово-частотных характеристик; Х4 – приборы для исследования амплитудных характеристик; Х5 – измерители коэффициента шума; Х6 – приборы для исследования корреляционных характеристик; Х8 – установки для поверки.

Ч. Приборы для измерения частоты и времени. Ч1 – стандарты частоты и времени; Ч2 – частотомеры резонансные; Ч3 – частотомеры электронно-счётные; Ч4 – частотомеры гетеродинные, ёмкостные и мостовые; Ч5 – синхронизаторы частоты; преобразователи частоты сигнала; Ч6 – синтезаторы частоты; делители и умножители частоты; Ч7 – приёмники сигналов эталонных частот и сигналов времени; компараторы частотные, фазовые, временные; синхрометры; Ч9 – преобразователи частоты.

И. Приборы для импульсных измерений. И1 – установки для поверки; И2 – измерители временных интервалов; И3 – счетчики числа

импульсов; И4 – измерители параметров импульсов; И9 – преобразователи импульсных сигналов.

Ф. Приборы для измерения фазовых сдвигов и группового времени запаздывания. Ф1 – установки для поверки; Ф2 – измерители фазовых сдвигов; Ф3 – фазовращатели измерительные; Ф4 – измерители группового времени запаздывания.

Е. Приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными. Е1 – меры, установки или приборы для поверки; Е2 – измерители полных сопротивлений и (или) полных проводимостей; Е3 – измерители индуктивности; Е4 – измерители добротности; Е6 – измерители сопротивлений; Е7 – измерители параметров универсальные; Е8 – измерители ёмкостей; Е9 – преобразователи параметров компонентов и цепей.

Р. Приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределёнными постоянными. Р1 – линии измерительные; Р2 – измерители коэффициента стоячей волны; Р3 – измерители полных сопротивлений; Р4 – измерители комплексных коэффициентов передач; Р5 – измерители параметров линий, передач; Р6 – измерители добротности; Р7 – измерители параметров.

Д. Аттеноуаторы и приборы для измерения ослаблений.

Л. Приборы общего применения для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов. Л2 – измерители параметров (характеристик) полупроводниковых приборов; Л3 – измерители параметров (характеристик) электронных ламп; Л4 – измерители шумовых параметров полупроводниковых приборов.

К. Комплексные измерительные установки.

Ш. Приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов. Ш1 – измерители низкочастотные; Ш2 – измерители высокочастотные.

Я. Блоки радиоизмерительных приборов.

Э. Измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов.

Б. Источники питания для измерений и радиоизмерительных приборов. Б2 – источники переменного тока; Б4 – источники калиброванного напряжения и тока; Б5 – источники постоянного тока; БО – источники с регулируемыми параметрами (постоянного или переменного тока); Б7 – источники постоянного и переменного тока универсальные.

Обозначение радиоизмерительного прибора состоит из буквенного обозначения подгруппы, номера вида и порядкового номера модели (типа), перед которым ставится черточка (дефис). Для модернизированных приборов к обозначению добавляются русские прописные буквы в алфавитном порядке. Например, П5-4Б – приёмник измерительный, модель 4, вторая модернизация.

Комбинированный прибор (измеряющий несколько параметров) получает обозначение соответственно виду, к которому он относится по основной выполняемой функции; при этом к обозначению вида может добавляться буква «К». Приборы с одинаковыми электрическими характеристиками, но различным конструктивным исполнением различаются порядковым номером модификации, который ставится через дробь в конце обозначения прибора. Например, ВК7-10А/1 – вольтметр универсальный цифровой, модель 10, модернизированный, модификация 1.

4.3. Метрологические характеристики средств измерений. Классификация погрешностей средств измерений

Важнейшим условием отнесения технических средств к средствам измерений является наличие у них метрологических характеристик.

Метрологическая характеристика (МХ) средств измерений – характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерений и на его погрешность. МХ, устанавливаемые нормативными документами, называют *нормируемыми* метрологическими характеристиками, а определяемые экспериментально – *действительными* метрологическими характеристиками. Различают характеристики, предназначенные для определения результатов измерений, и характеристики погрешностей СИ.

К метрологическим характеристикам, предназначенным для определения результатов измерений, относят следующие.

1. Функция преобразования $y = F(x)$ измеренного преобразователя или измерительного прибора и неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц входной величины x . Как правило, $F(x)$ задается в виде формулы и используется для определения значений измеряемой величины x путём обратного преобразования, т.е. $X = F^{-1}(Y)$, где Y – показания СИ, F^{-1} – функция, обратная функции преобразования.

2. Значение Y_N однозначной или значения многозначной меры. У мер нормируются номинальные или индивидуальные значения характеристики.

3. Цена деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры. Нормирование цены деления производства для СИ с равномерной шкалой.

4. Характеристики цифрового кода, используемого в СИ и их элементах. Эти характеристики нормируются для цифровых СИ и к ним относятся: вид входного и выходного кода, число рядов кода, цена единицы наименьшего ряда.

Многочисленные группы МХ образуют погрешности, обусловленные собственными свойствами СИ.

К метрологическим характеристикам погрешностей СИ относятся следующие.

1. Характеристики систематической составляющей погрешности Δ_C СИ:

- значение систематической составляющей Δ_C ;
- значение Δ_C и его математическим ожиданием $M[\Delta_C]$ и средним квадратическим отклонением $\sigma[\Delta_C]$.

Последние две величины обычно нормируют, в случае если можно пренебречь изменениями во времени. Следует отметить, что систематическая погрешность рассматривается как случайная величина для множества СИ данного типа.

2. Характеристики случайной составляющей $\overset{\circ}{\Delta}$ погрешности СИ:

- среднее квадратическое отклонение $\sigma \begin{bmatrix} \circ \\ \Delta \end{bmatrix}$;
- $\sigma \begin{bmatrix} \circ \\ \Delta \end{bmatrix}$ наряду с нормализованной автокорреляционной функцией $r_{\overset{\circ}{\Delta}}(\tau)$ или функцией спектральной плотности $S_{\overset{\circ}{\Delta}}(\omega)$;

- случайная составляющая погрешность от гистерезиса Δ_H^0 (вариация H_0 выходного сигнала СИ).

Последняя составляющая обусловлена отличием показаний данного экземпляра измерительного прибора от параметра входного сигнала при различной скорости и направлениям его измерения. Характеристики случайной составляющей погрешности СИ нормируются путём предела допускаемого $\sigma_d \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$.

В зависимости от влияния внешней среды погрешность СИ классифицируют на основную и дополнительную. Классификация погрешности СИ одного и того же типа при нормальных и рабочих условиях применения является важным фактором обеспечения единства измерений.

Суммарное значение M_X погрешностей СИ при нормальных условиях эксплуатации образует основную погрешность СИ.

Основная погрешность СИ (Δ_0) – погрешность СИ, применяемого в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность СИ ($\Delta_{сф}$) – составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального её значения или вследствие её выхода за пределы нормальной области значений.

Влияющая физическая величина – физическая величина, оказывающая влияние на размер измеряемой величины и (или) результат измерений. Нормальное значение или нормальная область значений влияющих величин устанавливается в технических условиях и других регламентирующих нормативных документах.

Нормальные условия измерений – условия измерений, характеризующие совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости.

В большинстве нормативных документов нормальными условиями являются те, при которых составляющая погрешности от действия совокупности влияющих величин не превышает 15% предела допускаемой основной погрешности СИ, к ним относят следующие наиболее распространенные условия:

- температура окружающей среды $293\text{K} \pm 5\text{K}$ ($20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$);
- атмосферное давление $101,3\text{кПа} \pm 4\text{кПа}$ (750мм рт.ст. $\pm 30\text{мм}$);

- относительная влажность $60\% \pm 15\%$;
- напряжение питающей электрической цепи (для СИ, имеющих электрические цепи) $220\text{В} \pm 10\%$ с частотой $50\text{Гц} \pm 0,5\text{Гц}$ или $400\text{Гц} \pm 10\text{Гц}$;
- форма кривой переменного напряжения питающей сети синусоидальная с коэффициентом гармоник не выше 5%.

Рабочие условия измерений – условия измерений, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочих областей. Например, для вольтметра переменного тока нормируют изменение показаний, вызванное отклонением частоты переменного тока от 50 Гц.

Рабочая область значения влияющих величин – область, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменение показаний СИ. Соответственно рабочие условия применения СИ – условия, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочей области, в пределах которых допускается эксплуатировать СИ с установленными МХ.

По форме представления погрешности СИ разделяют на абсолютные, относительные и приведённые. При этом различают погрешности мер, измерительных приборов и измерительных преобразователей.

Абсолютная погрешность измерительного прибора $\Delta\text{СИ}$ – это разность между показанием прибора ХИ и действительным (опорным) значением измеряемой величины

$$\Delta\text{СИ} = \text{ХИ} - \text{ХД(ХОП)}. \quad (4.1)$$

Абсолютная погрешность СИ выражается в единицах предельной величины.

Абсолютная погрешность меры – это разность между номинальным значением меры ХНОМ и действительным (опорным) значением воспроизводимой величины

$$\Delta\text{М} = \text{ХНОМ} - \text{ХД(ХОП)} \quad (4.2)$$

Относительная погрешность измерительного прибора – это отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному (опорному) значению измеряемой величины или к результату измерений ХИЗМ

$$\delta_{СИ} = \frac{\Delta_{СИ}}{X_{д}(X_{ОП})} \quad \text{или} \quad \delta_{СИ} = \frac{\Delta_{СИ}}{X_{ИЗМ}}. \quad (4.3)$$

Часто значение относительной погрешности выражают в %. В этом случае

$$\delta_{СИ} = \frac{\Delta_{СИ}}{X_{д}(X_{ОП})} \cdot 100 \quad \text{или} \quad \delta_{СИ} = \frac{\Delta_{СИ}}{X_{ИЗМ}} \cdot 100. \quad (4.4)$$

Относительная погрешность меры – это отношение абсолютной погрешности к номинальному значению воспроизводимой ей величины или действительному (опорному) значению. Относительная погрешность меры – %, может быть выражена как

$$\delta_{М} = \frac{\Delta_{М}}{X_{НОМ}} \cdot 100.$$

Оценка точности измерений с помощью относительной погрешности имеет существенный недостаток, выражающийся в том, что при уменьшении показаний измерительного прибора значение относительной погрешности возрастает даже в случае одной и той же абсолютной погрешности в диапазоне измерений. Поэтому для более объективной оценки погрешности измерений на практике широко используется приведённая погрешность.

Приведённая погрешность измерительного прибора – это отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta_{СИ}}{X_{N}} \cdot 100, \quad (4.5)$$

где X_N – нормирующее значение, условно принятое для оценки погрешности.

X_N – значение, как правило, равное верхнему пределу измерений, или диапазону измерений, или длине шкалы и т.д.

Динамические характеристики СИ, отражающие инерционность измерительного прибора, обуславливают динамическую погрешность СИ.

Динамическая погрешность СИ (Δ_{dyn}) – это разность между погрешностью СИ в динамическом режиме и погрешностью СИ, используемого для измерения постоянной величины, в данный момент времени. Эта составляющая зависит от динамических свойств СИ и от частотного спектра измеряемого сигнала.

Для ряда СИ, например, радиоизмерительных приборов, важным является то, с каким объектом измерений контактирует чувствительный элемент. При нормировании МХ СИ выделяют составляющую погрешности Δ_{int} – погрешность, обусловленную взаимодействием СИ с объектом измерений.

Составляющие погрешности СИ образуют инструментальную погрешность Δ – погрешность, обусловленную погрешностью применяемого СИ. Модель инструментальной составляющей погрешности СИ можно представить в виде [1]:

$$\Delta = \Delta_0 \times \sum_{j=1}^L \Delta_{cj} \times \Delta_{dyn} \times \Delta_{int} ,$$

где Δ_0 – основная погрешность СИ; $\sum_{j=1}^L \Delta_{cj}$ – объединение дополнительных погрешностей Δ_{cj} СИ, обусловленных действием влияющих величин; L – число учитываемых влияющих величин.

В зависимости от свойств СИ данного типа составляющие Δ_{cj} и Δ_{dyn} могут отсутствовать. В практике измерений погрешности СИ ограничивают допускаемыми пределами их значений.

Предел допускаемой погрешности СИ – наибольшее значение погрешности СИ, устанавливаемое нормативным документом для данного типа СИ, при котором оно не признается годным к применению. При превышении установленного предела погрешности СИ признается негодным (в данном классе точности). Это состояние СИ определяется в результате поверки (калибровки) данного средства. Обычно устанавливают пределы допускаемой погрешности, т.е. границу поля допуска, за которую не должна выходить погрешность.

Следует отметить, что помимо погрешности СИ к МХ, влияющим на точность, относятся нестабильность, порог чувствительности, дрейф нуля и др.

Нестабильность СИ – это отношение изменения показания прибора ΔX к вызывающему его изменению измеряемой величины ΔY

$$S = \frac{\Delta X}{\Delta Y}.$$

Входное сопротивление СИ (входной импеданс) – это характеристика, определяющая реакцию входного сигнала СИ на его подключение к измеряемому объекту, имеющему определённое (фиксированное) внутреннее сопротивление. Например, при измерении напряжения осциллографом его полное входное сопротивление определяет предельное допустимое сопротивление подключаемого источника сигнала, при котором погрешность измерения не превышает установленных значений.

Градуированная характеристика СИ (функция преобразования) – это зависимость между значениями величин X на входе и Y на выходе СИ, полученная экспериментально функция преобразования $f(x)$ может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы.

4.4. Нормируемые метрологические характеристики и классы точности средств измерений

Номенклатура нормируемых МХ для СИ и способы их нормирования определяются стандартом ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений». Нормированию подлежат следующие метрологические характеристики.

1. *Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправки):*

- $f(x)$ – функция преобразования;
- y – значение однозначной или многозначной меры;
- цена деления шкалы измерительного прибора;
- вид выходного кода, число разрядов кода, цена единицы наименьшего разряда кода СИ, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

2. *Характеристики погрешностей СИ:*

- характеристики систематической составляющей погрешности СИ: Δ_c , $M[\Delta_c]$, $\sigma[\Delta_c]$;

- характеристики случайной составляющей погрешности СИ: $\sigma[\Delta]$, $r_{\Delta}^0(\tau)$, $S_{\Delta}^0(\omega)$, Δ/\dots ;

- функции или плотности распределения (законы распределения) составляющих погрешности;

- значения погрешности в интервале влияющих величин.

3. *Характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам:*

- $\Psi(\zeta)$ – функция влияния;

- $\varepsilon(\zeta)$ – изменения значений МХ СИ, вызванные изменением влияющих величин ζ в установленных пределах.

4. *Динамические характеристики СИ (полные и частные).*

Полную динамическую характеристику нормируют из числа следующих: τ_r – время реакции; γ_{dam} – коэффициент демпфирования; T – постоянная времени; $A(\omega_0)$ – значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте; ω_0 – значение резонансной частоты.

Для АЦП и ЦАП динамическими характеристиками являются: t_d – погрешность датирования отсчета; f_{max} – максимальная частота (скорость) измерения; t_r – время реакции преобразователя.

Нормированию подлежат также характеристики СИ, отражающие их способность влиять на инструментальную составляющую погрешности вследствие взаимодействия СИ с любым из подключенных к их входу и выходу компонентов (таких как объект измерений, измерительный прибор или преобразователь и т.п.). В обоснованных случаях подлежат нормированию неинформативные параметры выходного сигнала СИ. Определение того, важна ли данная погрешность или нет, производится на основе критериев существенности, приведённых в ГОСТ 8.009-84.

Правила выбора комплексов нормируемых МХ и способов их нормирования приведены в методическом материале.

4.5. Классы точности средств измерений

В настоящее время в эксплуатации находится значительное число (сотни тысяч) СИ, метрологические характеристики которых нормированы на основе классов точности.

Класс точности СИ – обобщённая характеристика данного типа СИ, как правило, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности – общая характеристика данного типа СИ, она позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ этого типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств. Это важно при выборе СИ в зависимости от требуемой точности измерений.

Впервые понятие «класс точности» было введено в 30-е годы прошлого века для стандартизации стрелочных электроизмерительных приборов [5]. У таких СИ наиболее значима основная погрешность без выделения систематической и случайной составляющей этой погрешности. Особенностью данных приборов является то, что отсчёт показаний всегда производится в установившемся режиме, так что динамические свойства СИ не влияют на погрешность измерений. В таких условиях знание класса точности прибора позволяет относительно просто определить допустимую погрешность измерения. Все это обусловило широкое распространение деления СИ по классам точности. При этом всегда следует иметь в виду, что у этих СИ нормируется суммарная погрешность в установившемся режиме. Кроме того, классы точности не устанавливаются на СИ, у которых отдельно нормируется систематическая и случайные составляющие основной погрешности или динамическая погрешность является значительной. Область использования понятия классов точности для характеристики СИ определяется ГОСТ 8.401-80 «ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования». Если СИ предназначено для измерений на нескольких диапазонах одной и той же физической величины или для измерения двух и более различных физических величин (например, комбинированный прибор – тестер), то в этом случае допускается присваивать различные классы точности для разных диапазонов измерения и различных измеряемых величин. Для одного и того же СИ разрешается устанавливать не более пяти классов точности.

Класс точности СИ присваивают при их разработке по результатам испытаний (испытаний с целью утверждения типа). Класс точности указывают непосредственно на измерительном приборе или технической документации на данный тип СИ. В связи с тем, что в процессе эксплуатации СИ их точностные характеристики обычно ухуд-

шаются, то в обоснованных случаях допускается понижать класс точности по результатам поверки (калибровки).

4.6. Формы представления классов точности средств измерений

Форма представления класса точности СИ определяется пределами допускаемой погрешности измерений. Пределы допускаемых погрешностей измерений выражаются границами абсолютной и относительной (приведённой) погрешности СИ. Пределы допускаемых основных погрешностей определяются по одночленным или двухчленным формулам, а также по таблицам.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности Δ должен определяться по одночленной

$$\Delta = \pm a$$

или двухчленной

$$\Delta = \pm (a + bX) \quad (4.6)$$

формулам, где X – номинальное значение величины, воспроизводимой многозначной мерой, либо показание измерительного прибора, либо значение сигнала на входе измерительного преобразователя.

Значение X при применении двухчленной формулы принимается без учета знака; a и b – постоянные величины.

Выбор той или иной формулы тесно связан с характером изменения погрешности при возрастании измеряемой величины (рис. 4). Если систематическая погрешность не изменяется с ростом X , т.е. имеет форму аддитивной погрешности, то может быть использована одночленная формула. В случае мультипликативной погрешности следует применять двухчленную формулу.

Рассмотрим некоторые примеры. Для генератора типа Г5-7А предел допускаемой абсолютной основной погрешности установки длительности импульса выражается одночленной формулой

$$\Delta = \pm 4 \text{ мкс.}$$

Для анемометра индукционного типа предел допускаемой абсолютной основной погрешности выражается в виде двучленной формулы

$$\Delta = \pm (0,5 + 0,05v) \text{ м/с,}$$

где v – измеряемая скорость ветра, м/с.

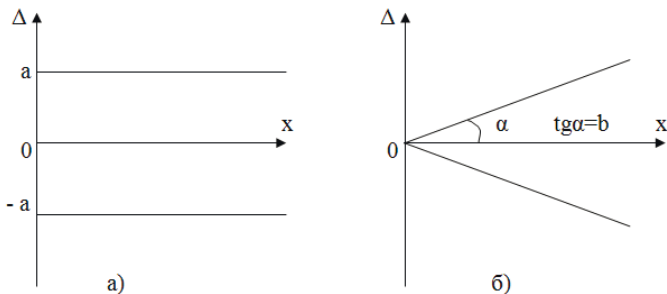


Рисунок 4 – Случаи изменения границ абсолютных погрешностей СИ

Для измерительных приборов и преобразователей допускается также определение предела допускаемой абсолютной основной погрешности Δ по формуле

$$\Delta = \pm (a'X + b'X_M),$$

где X – показание прибора или величина сигнала; X_M – конечное значение диапазона измерений или диапазона значений сигнала; a', b' – постоянные величины.

Относительная погрешность δ должна быть выражена одночленной формулой

$$\delta = \pm \frac{100\Delta}{X} = \pm q, \% . \quad (4.7)$$

Либо двучленной формулой

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_M}{X} - 1 \right) \right] \quad (4.8)$$

или вида

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_0}{X} - 1 \right) \right], \quad (4.9)$$

или вида

$$\delta = \pm \left[e + \frac{d}{X} (1 + e) \right], \quad (4.10)$$

где X_M – наибольшее значение величины, воспроизводимой многозначной мерой, конечное значение диапазона измерений измерительного прибора или конечное значение диапазона сигнала на входе измерительного преобразователя; X_0 – значение величины, воспроизводимой многозначной мерой, или значение измеряемой прибором величины, или значение сигнала на входе преобразователя, при котором предел допускаемой относительной основной погрешности δ имеет минимальное значение; c , d и e – величины постоянные.

Значения X , X_M и X_0 при применении указанных формул принимаются без учёта знака.

Пределы допускаемых погрешностей $\delta_{пр}$ большинства электроизмерительных приборов, манометров, приборов измерения физико-химических величин и др. выражают в форме приведённых погрешностей, %

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta}{X_n} * 100 = \pm P, \% , \quad (4.11)$$

где Δ – допускаемая абсолютная погрешность; X_N – нормирующее значение, выраженное в единицах абсолютной погрешности; P – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда.

Для СИ с равномерной или степенной шкалой нормирующее значение при установлении приведённой погрешности принимается равным:

- конечному значению рабочей части шкалы, если нулевая отметка находится в ее начале;
- арифметической сумме конечных значений рабочей части шкалы без учёта их знака, если нулевая отметка находится внутри рабочей части шкалы;

- для мер – их номинальному значению;
- для СИ с логарифмической или гиперболической шкалой – всей длине шкалы;
- для СИ физико-химических величин, отсчётные устройства которых отградуированы в процентах концентрации, устанавливается в нормативной документации на конкретные типы приборов.

Положительные числа q, p, c, d, e выбираются из установленного ряда: $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2,0 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4,0 \cdot 10^n$; $5,0 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где n – может иметь значения: 1; 0; -1; -2 и т.д. Из этого ряда средства измерений, которые характеризуются пределами допускаемых относительных и приведённых погрешностей, присваиваются классы точности в виде чисел, очевидно, что у более точного СИ класс точности определяется меньшим числом, чем у менее точного. Например, при всех остальных одинаковых характеристиках измерительный прибор класса точности 1,5 является более точным по сравнению с прибором класса точности 2,0. При установлении класса точности СИ руководствуются правилом: если значение допустимой погрешности находится между смежными классами точности, то такому СИ присваивают класс точности, соответствующий большей погрешности, т.е. большему из смежных числу. Число, обозначающее класс точности, соответствует пределу допускаемой основной приведённой погрешности для данного типа СИ.

Некоторым СИ, например, линейно-угловых измерений, которые характеризуются пределами абсолютных погрешностей, также присваиваются классы точности, но в виде порядковых номеров. При этом чем выше предел допускаемой погрешности, тем больше порядковый номер. Например, у концевой меры класса I длиной 2 метра предел допускаемой основной погрешности $\Delta = \pm 8 \cdot 10^{-6}$ м; для аналогичной меры класса II соответствующий предел $\Delta = \pm 12 \cdot 10^{-6}$ м, а для класса III $\Delta = \pm 2 \cdot 10^{-7}$ м.

Отсчётные устройства некоторых СИ градуируются в логарифмических единицах, т.е. в неперах или в децибелах. Классы точности выражаются тогда в тех же единицах. Например, при значении предела допускаемой абсолютной погрешности измерительного прибора $\pm 0,5$ дБ класс точности будет равен 0,5 дБ.

Если нормируются пределы допускаемой относительной основной погрешности согласно двучленным формулам (4.8, 4.9), то СИ

присваиваются классы точности в виде отношения коэффициентов c/d ; например, при $c = 0,05$ и $d = 0,02$ класс точности будет $0,05/0,02$.

В некоторых случаях пределы допускаемой относительной погрешности определяются двучленной формулой (4.10). Тогда класс точности средства измерений выражают числом, равным коэффициенту e ; это число должно выбираться из указанного выше ряда. Так, например, для мостов переменного тока, если коэффициент $e = 0,1$, то класс точности моста будет $0,1$.

У современных СИ температуры классы точности обозначаются прописными буквами латинского алфавита в прямом порядке, соответствующем росту пределу допускаемой погрешности. При этом наименьшим пределам соответствует класс точности А.

В обоснованных случаях допускается класс точности СИ устанавливать в виде более сложных формул или в виде графика.

Обозначение классов точности СИ наносят на шкалы, циферблат или корпус прибора с помощью условных обозначений. Если предел допускаемой абсолютной погрешности определяется по одночленной или двучленной формуле $\pm (a+bX)$, класс точности обозначают прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами. Например: С-й класс точности обозначается:

Кл. I или I; Кл. А или А.

Для СИ, характеризуемых пределом абсолютной погрешности, выражаемой в децибелах, например, при $\Delta = \pm 1,5$ дБ, класс точности обозначается $1,5$ дБ.

Если класс точности определяется пределом допускаемой приведенной погрешности с нормирующим X_N значением, выражаемым в единицах измеряемой величины, например, $\delta = \pm 0,5\%$, то класс точности обозначается 0.5 .

Классы точности СИ, характеризуемые пределом допускаемой относительной погрешности, определяемой по одночленной формуле в процентах X , например, $\delta = \pm 5,0\%$, обозначаются числами в кружке, совпадающими со значением допускаемой основной погрешности:

5

Классы точности электроизмерительных и радиоизмерительных приборов, допускаемые погрешности которых выражаются в процентах от нормирующего значения X_N , определяемого длиной шкалы l ($X_N = \frac{X_2 - X_1}{l}$), где X_2 и X_1 – значения отметок шкалы, ближайших к

указателю с обеих сторон; l_1 – расстояние между этими отметками, обозначаются числами, заключёнными в уголок. Эти числа должны совпадать со значениями допускаемой основной приведённой погрешности. Например, при $\delta = \pm 2,5\%$ класс точности обозначают 2,5.

В этом случае например, вольтметр со шкалой 5–150 В класса точности 2,5 допускаемую абсолютную погрешность определяют по формуле


$$\Delta = \pm \frac{2,5 \cdot X_n}{100} = \pm \frac{2,5 \cdot 145}{100} = \pm 3,63 \text{ В},$$

где $X_n = X_{\max} - X_{\min}$; X_{\max} и X_{\min} конечное и начальное значение шкалы прибора.

Для СИ, пределы допускаемой основной погрешности, которые выражаются с учётом аддитивной и мультипликативной составляющих по двучленной формуле, классы точности обозначают числами c и d , разделяя их косой чертой. Например, если допустимая погрешность СИ имеет вид

$$\delta = \pm \left[2 + 0,2 \left(\frac{X_m}{X} - 1 \right) \right], \quad (4.12)$$

то класс точности записывается в виде 2/0,2.

Для СИ с существенно неравномерными шкалами (логарифмической, гиперболической и др.) дополнительно может наноситься знак  и знаки, указывающие начало и конец его действия по шкале (точки, треугольники, линии и т.п.). Надо иметь в виду, что это на класс точности, а лишь указание, что на отмеченном участке шкалы относительная погрешность СИ не превышает 5% от значения измеряемой величины.

Обозначения нормального значения или нормальной области значений, если это предусмотрено техническими условиями или другим нормативным документом на конкретный тип СИ, на шкале измерительного прибора подчеркивают линией, а обозначения границ расширенных областей не подчеркивают. Например, если вольтметр переменного тока работает только на частоте 50 Гц, наносят обозначения 50 Гц. Обозначение на шкале 40–55 – 100 Гц означает, что у данного измерительного прибора нормальной областью частот явля-

ется диапазон от 40 до 55 Гц. Этому диапазону соответствует указанный на шкале класс точности. В диапазоне от 55 до 100 Гц данное СИ можно применять, но при этом появится дополнительная частотная погрешность.

Обозначение класса точности обычно не наносится на малогабаритные СИ и высокоточные меры. Для большинства радиоизмерительных приборов в техническом описании, паспорте (формуляре) приводятся формулы, позволяющие определить основную и дополнительную погрешности в соответствующем диапазоне измерений с учётом влияющих величин. В этом случае на СИ класс точности не указывается.

Зарубежные фирмы, выпускающие измерительную технику, обычно не используют понятие «класс точности» в указанном виде, а приводят в паспорте СИ лишь значения пределов гарантированной погрешности при некоторых условиях эксплуатации. Например, абсолютная погрешность СИ может быть указана в виде $\Delta = \pm (0,2 X + 0,02\% \text{ от } X_M)$ за три месяца при температуре 10...45 °С, где X – значение измеряемой величины; X_M – максимальное значение диапазона измерений.

4.7. Метрологическая надежность и виды технического состояния средств измерений

Средство измерения, как специальное техническое устройство, может находиться в следующих состояниях: исправное и неисправное состояние; работоспособное и неработоспособное состояние; предельное состояние.

Исправное состояние – это состояние СИ, при котором оно соответствует всем требованиям, установленным нормативной документацией. Для СИ такой нормативной документацией являются документы, регламентирующие поверку данного прибора (ГОСТ, инструкция по поверке, методики поверки и др.).

Неисправное состояние – это состояние СИ, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований нормативной документации. Для СИ – это выполнение всех метрологических и технических требований, в т.ч. требований к внешнему виду, к отсутствию наружных повреждений, наличию пломб и т.д.

Работоспособное состояние – это состояние СИ, при котором оно способно выполнять заданные функции (измерять), сохраняя значения параметров в пределах, установленных нормативной документацией. Как видно из определения, требования к СИ, находящемуся в этом состоянии, менее жесткие, чем к исправному. По сути СИ, находясь в работоспособном состоянии, должно решать установленные для него измерительные задачи. Например, если на циферблате манометра имеется трещина на стекле, но он функционирует, то этот прибор может быть в работоспособном состоянии, хотя формально находится в неисправном состоянии.

Неработоспособное состояние – это состояние СИ, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным нормативной документацией. У СИ заданными параметрами являются его метрологические характеристики. Поэтому неспособность СИ выполнять измерительные функции с требуемой для него точностью является признаком неработоспособного состояния.

Предельное состояние – это состояние СИ, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или необходимости проведения среднего или капитального ремонта. Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются, как правило, разработчиком СИ в эксплуатационно-технической документации изделия.

У средства измерения, находящегося в эксплуатации, в т.ч. и на хранении, может произойти отказ.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности СИ.

По форме проявления у СИ могут возникнуть явные и скрытые отказы, которые в зависимости от времени подразделяются на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров СИ. Внезапный отказ обычно является следствием постепенного накопления неисправностей и повреждений. У СИ этот отказ, как правило, определяется оператором визуально, и такой прибор изымается из применения.

Постепенный отказ – отказ СИ, характеризующийся постепенным изменением одного или нескольких основных параметров. В случае когда основными параметрами являются МХ СИ, постепенный отказ называют – *метрологическим отказом СИ*. Метрологические отказы обнаруживаются поверкой.

С течением времени основная погрешность, изменяясь, может выйти за пределы, указанные в нормативной документации (техническом паспорте, формуляре) данного СИ. Момент времени, в который происходит это событие, определяет момент наступления метрологического отказа.

Надежность СИ, обусловленную метрологическим отказом, в теории измерений называют метрологической надежностью.

Метрологическая надежность СИ – это свойство СИ выполнять данные функции (иметь работоспособное состояние), сохраняя во времени МХ в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Метрологическая надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения СИ и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или определённое сочетание этих свойств как для СИ, так и для его частей. «Эксплуатационные показатели» – показатели производительности, быстродействия, расхода электроэнергии, устойчивости к климатическим и механическим воздействиям и т.п.

Специфика метрологической надежности состоит в том, что для неё нельзя принимать фундаментальные допущения классической теории надежности, заключающиеся во взаимной независимости отказов элементов и стационарности потоков отказов. В продолжение этого, классическая теория надежности исследует в основном изделия, обладающие только двумя состояниями: работоспособности и неработоспособности. Для СИ эти состояния связаны с допуском (полем допуска) на метрологические характеристики. Однако допуск в зависимости от цели измерений может быть различным даже у одного и того же типа СИ. При этом само понятие отказа становится в какой-то степени условным, т.к. зависит от допуска наверяемый параметр.

Свойство СИ непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки называют *безотказностью СИ*. Численно безотказность определяется вероятностью

$P(t)$ – вероятность того, что погрешность СИ в течение определённого времени не выйдет за допустимые для него пределы при постепенном изменении характеристик его элементов. Для современных СИ устанавливают значение равное $P(t) = 0,8...0,95$.

В настоящее время в качестве характеристики надежности СИ используется один из нескольких показателей:

$P(t)$ – значение вероятности безотказной работы за время t – вероятность того, что в течение промежутка времени t не возникает ни одного отказа;

T_0 – значение средней наработки на отказ. T_0 – это средний промежуток времени между двумя отказами, определяемый отношением наработки восстанавливаемого СИ к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Этим термином можно назвать кратко среднюю наработку до отказа, когда после каждого отказа СИ восстанавливается до первоначального состояния. В этом случае значения средней наработки на отказ и средней наработки до отказа совпадают и определяются по формуле

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt . \quad (4.13)$$

В случае изменения $P(t)$ по экспоненциальному закону и интенсивностью отказов $\lambda = \text{const}$ имеем:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

K_T – вероятность того, что СИ окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение СИ по назначению не предусматривается. В установившемся процессе эксплуатации K_T – определяется по формуле

$$K_T = \frac{T_0}{T_0 + T_B} \quad (4.14)$$

где T_B – время восстановления СИ.

T_p – технический ресурс – это наработка СИ от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта определённого вида до перехода в предельное состояние.

T_c – срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации СИ или её возобновления после ремонта определённого вида до перехода в предельное состояние.

T_x – срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования СИ, в течение и после которой сохраняются показатели безотказности, долговечности и ремонтпригодности в установленных пределах. Различают сроки сохраняемости до ввода в эксплуатацию и срок сохраняемости в период эксплуатации.

Метрологическая надёжность СИ в значительной мере определяется условиями их применения, интенсивности использования.

При изучении метрологической надёжности в практической метрологии наиболее тщательно анализируют количество приборов, имеющих метрологические отказы, из общей совокупности эксплуатируемых СИ. Относительное количество СИ, имеющих метрологические отказы за межповерочный интервал, по сравнению с совокупностью всех СИ данного вида (подгруппы, типа), находящихся в подконтрольной эксплуатации, определяется коэффициентом метрологических отказов α .

С целью объективного назначения межповерочного интервала и совершенствования системы эксплуатации СИ необходимо знать относительный период применения СИ за интервал наблюдения. Такой характеристикой интенсивности применения является K_u – коэффициент использования СИ, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1. Очевидно, что у постоянно включенного прибора, например, у щитового вольтметра, измеряющего напряжение в сети питания, значение $K_u = 1$.

Проведённые исследования [2,6] результатов поверки большого количества современных СИ, находящихся в эксплуатации на оборонных предприятиях, позволили определить усредненные значения α и K_u для обширной подгруппы СИ. Численные значения α и K_u приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Численные значения коэффициентов α и K_u

Вид измерений	Подгруппа	Значение коэф- фициента α	Значение коэф- фициента K_u
СИ радиотехни- ческих величин	Г	0,4	0,023
	С	0,28	0,062
	Ф	0,2	0,017
	Х	0,25	0,059
	Д	0,21	0,043
	В	0,36	0,094
	Е	0,21	0,044
	М	0,3	0,051
	Р	0,2	0,064
	Ч	0,4	0,051
	И	0,17	0,033
	П	0,18	0,023
	У	0,14	0,017
	Л	0,3	0,017
Б	0,17	0,23	
Ш	0,17	0,011	
Я	0,17	0,023	
СИ электриче- ских величин	щитовые	0,22	0,21
	переносные	0,39	0,083
СИ ионизирую- щих излучений, состава и свойств жидкостей и га- зов	СИ ионизирую- щих излучений	0,24	0,091
	СИ состава и свойств жидко- стей и газов	0,24	0,075
СИ теплотехни- ческих и механи- ческих величин	СИ давления	0,27	0,49
	СИ расхода и ко- личества	0,25	0,34
	СИ температуры	0,23	0,28

Обеспечение метрологической надежности СИ в процессе эксплуатации достигается путём проведения их периодических поверок или калибровки.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Поверочные схемы и виды поверок средств измерений

Технической формой надзора за единообразием СИ является государственная (ведомственная) поверка СИ, устанавливающая их исправность.

Достоверная передача размера единиц во всех звеньях метрологической цепи от эталона до рабочего СИ производится в определённом порядке, приведённом в поверочных схемах.

Поверочная схема – нормативный документ, устанавливающий соподчинение СИ, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим СИ (с указанием методов и погрешностей при передаче). Различают государственные и локальные поверочные схемы.

Государственная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на все СИ данной физической величины, имеющиеся в стране.

Локальная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на СИ данной физической величины, применяемое в регионе, отрасли, ведомстве или отдельном предприятии (организации).

Государственные поверочные схемы для СИ физической величины разрабатывают и вводят в виде государственного стандарта. В ходе их создания обосновывают структуру схемы (вид вторичных эталонов, число разрядов рабочих эталонов, метод поверки) и другие условия. Локальные поверочные схемы не должны противоречить государственным, но могут быть составлены при их отсутствии. В локальных поверочных схемах можно указывать конкретные типы СИ. Локальная поверочная схема, как нормативный документ или стандарт предприятия, должен быть согласован с территориальным органом государственной метрологической службы.

Поверочные схемы оформляют в виде чертежа и дополняют текстовой частью. На чертеже указывают наименование средств измерений и методы поверки, номинальные значения или диапазоны значений физических величин средств измерений и методы поверки. Чертеж должен состоять из расположенных друг под другом и разделённых штриховыми линиями полей, число которых зависит от структуры поверочной схемы. Поля должны иметь наименования, указывае-

мые в левой части чертежа, отделённой сплошной вертикальной линией. В верхнем поле чертежа государственной поверочной схемы, в основе которой лежит государственный эталон, указывают наименование эталонов в порядке их соподчинённости. В верхнем поле чертежа ведомственной или локальной поверочной схемы.

Поверочная схема помимо наглядного схематического изображения передачи размера физической величины содержит и требования к средствам и методам поверки, т.е. представляет собой структуру плана метрологического обеспечения вида измерений.

Рассмотрим, например, компоновку государственной поверочной схемы для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в волновом тракте в диапазоне частот 78,3 ... 178,6 ГГц. Основным в этой схеме (рис. 5) является государственный эталон единицы мощности, который состоит из комплекса следующих средств измерений: три калориметрических измерителя мощности с отчётными устройствами; волноводная сличительная установка; измерительная установка постоянного тока. Эталон обеспечивает воспроизведение единицы по средним и квадратическим отклонениям результата, не превышающим $S_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ для электромагнитных колебаний мощностью $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ Вт.

Функции рабочих эталонов в поверочной схеме выполняют калориметрические измерители мощности, которые поверяют образцовые средства измерений непосредственным сличением или при помощи компараторов.

Для средств измерений производных величин, единицы которых воспроизводят методом косвенных измерений, в верхнем поле чертежа указывают наименования рабочих эталонов, применяемых для воспроизведения данной единицы и заимствования из других государственных поверочных схем (со ссылкой на эти поверочные схемы). Под этими наименованиями (ниже) приводят номинальные значения или диапазоны значений физических величин и значения их погрешностей.

Под полем эталонов располагают поле рабочих эталонов. В тех поверочных схемах, где должна быть показана передача размера единицы от образцовых средств измерений, заимствованных из других поверочных схем, их наименования помещают в специально отведённом поле. В ведомственных и локальных поверочных схемах указывают разряды образцовых средств измерений, соответствующие при-

своённым этим средствам измерений в государственных поверочных схемах. Под наименованиями образцовых средств измерений показывают диапазоны измерений и значения погрешностей средств измерений. Поле рабочих средств измерений помещают над полем подчинённого рабочего эталона. Слева направо в порядке возрастания в нём располагают погрешности группы рабочих средств измерений, поверяемых по образцовым средствам одного наименования. Для каждой группы указывают вид, диапазон измерений и значения погрешностей средств измерений.

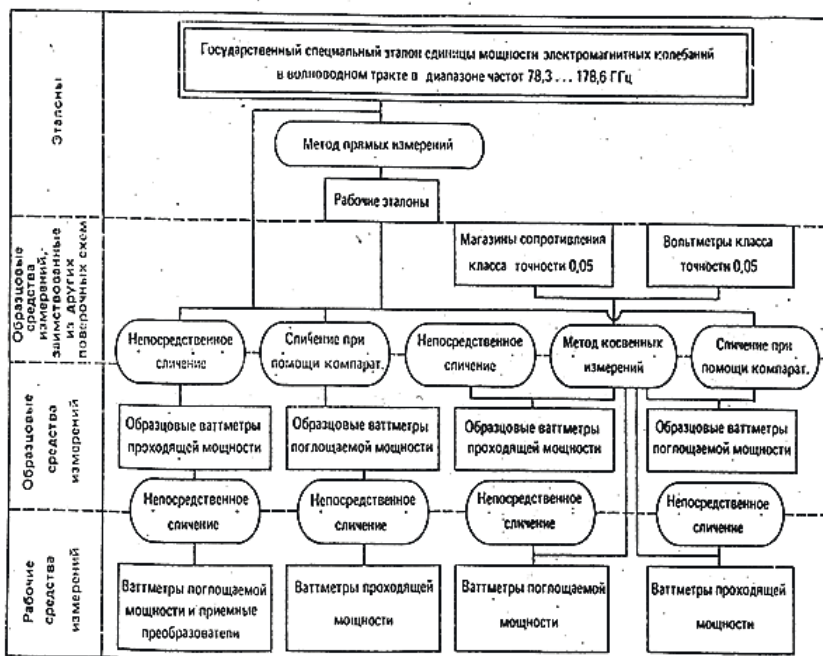


Рисунок 5 – Структура государственной поверочной схемы для средств измерений электромагнитных колебаний в волноводном тракте в диапазоне частот 78,3...178,6 ГГц

Необходимым условием построения поверочных схем является установление методов определения её параметров. Существуют методики, которые позволяют рассчитывать параметры поверочных схем: число её ступеней, соотношение погрешностей образцового и поверяемого средств измерений на основе анализа их составляющих,

максимально допустимые соотношения погрешностей поверяющего и поверяемого средств измерений и. д.

Построение поверочных схем предполагает формирование (эталонов средств измерений высшей точности, образцовых и рабочих средств измерений).

Потребности практической метрологии не всегда позволяют придерживаться указанного условия. Прежде всего, это происходит тогда, когда не полностью сформирован парк образцовых средств измерений тех или иных величин. Применение в этих условиях методов экспертных оценок приводит, как правило, к созданию ведомственных поверочных схем с неоправданно завышенными запасами точности, необоснованным коэффициентом использования образцовых средств.

Таким образом, параметры поверочных схем необходимо определять с учётом имеющегося и формируемого парка образцовых средств измерений, требуемой достоверности поверки рабочих средств измерений. Для решения этой задачи следует найти число ступеней поверочной схемы и оценить степень рациональности её построения, т.е. рассчитать рациональное число ступеней поверочной схемы. Для этого находят минимально необходимое и максимально возможное число ступеней и по коэффициенту избыточности поверочной схемы выбирают рациональное число её звеньев. Под коэффициентом избыточности понимают отношение количества средств измерений, обеспечиваемых поверкой при максимально возможном числе ступеней поверочных схем, к количеству реально эксплуатируемых средств измерений.

Число ступеней поверочной схемы между минимальным и максимальным значением выбирают так, чтобы наиболее рационально обеспечить поверкой весь парк средств измерений данной физической величины. При этом следует учитывать:

- необходимость резерва рабочих эталонов на случай отказа основного;
- особенности системы передачи размеров отдельных физических величин, требующих дополнительных разрядов точности рабочих эталонов;
- географическую отдалённость части рабочих средств измерений, для поверки которых в районе их размещения содержатся специальные средства измерений высшей точности или эталонов – переносчиков;

- исторически сложившуюся систему передачи размеров единиц.

Следует признать целесообразным установление обязательных поверочных схем, определяющих наиболее эффективное использование ресурсов поверки на данном предприятии или в данном органе метрологической службы.

5.2. Виды поверок

Отличительной особенностью средств измерений от других технических средств является то, что они обладают метрологическими свойствами и содержат в себе информацию о единице измеряемой величины. Средства измерений приобретают метрологические свойства в процессе их изготовления и градуировки. В процессе эксплуатации эти свойства изменяются, и в некоторых случаях может наступить метрологический отказ. Для обеспечения единообразия средств измерений с целью предотвращения и выявления метрологических отказов проводят их поверку после изготовления и ремонта, а также при необходимости в процессе эксплуатации. Регламентируются следующие виды поверки: первичная, периодическая, внеочередная, инспекционная и экспертная. Первичная поверка сопровождается выпуском средств измерений в обращение из производства или ремонта. В отдельных обоснованных случаях допускается выборочная первичная поверка средств измерений.

Периодическая поверка проводится при эксплуатации и хранении средств измерений через определённые межповерочные интервалы (МПИ) времени, которые устанавливаются, исходя из обеспечения исправности средств измерений на период между поверками.

Внеочередную поверку производят независимо от сроков периодической поверки в следующих случаях при необходимости удостовериться в пригодности к применению средств измерений; при повреждении поверительного клейма, пломбы или утрате документа о поверке; при вводе в эксплуатацию средств измерений, поступающих после расконсервации; при необходимости контроля результатов периодической поверки; при вводе в эксплуатацию после хранения в установленные сроки или при передаче на длительное хранение.

При инспекционной поверке выявляют пригодность к применению средств измерений, находящихся в эксплуатации, а также осу-

ществляют государственный и ведомственный надзор за состоянием и применением средств измерений.

Экспертная поверка необходима при возникновении спорных вопросов о метрологических характеристиках, исправности средств измерений, которые для унификации сводятся к следующим: непосредственное сличение при помощи компаратора (т.е. при помощи средств сравнения); метод прямых измерений; метод косвенных измерений; метод независимой поверки (т.е. поверки средств измерений относительных величин, не требующий передачи размеров единиц).

Средства измерений, состоящие из нескольких частей (элементов), можно поверять поэлементно или комплектно. При поэлементной поверке погрешности средства измерений определяют погрешности составных частей. Этот вид поверки является расчётно-экспериментальным и, как правило, применяется для сложных приборов, для которых отсутствуют рабочие эталоны измерений, позволяющие определять погрешность во всём диапазоне измерений. Например, поэлементная поверка практикуется для различных измерительных магазинов, измерительных линий, информационных измерительных систем и т.д.

При комплектной поверке определяют погрешности средства измерений в целом для всего измерительного прибора или измерительной системы. Этот вид поверки является более информативным и достоверным. Его целесообразно применять для средств измерений, в которых влияние взаимодействия составных компонентов на метрологические характеристики трудно оценить заранее. Известны два основных способа реализации комплектной поверки. Первый связан с использованием для поверки калибраторов, формирующих образцовые сигналы, подаваемые на вход поверяемого средства измерений. Второй предусматривает применение рабочих эталонов для формирования сигналов, подаваемых на вход поверяемого прибора или измерительной системы, и сравнения результатов измерения, полученных образцовыми и поверяемыми средствами измерения. При этом в том и другом способе необходимо подавать на вход поверяемого средства измерений специальные испытательные сигналы. Комплектная поверка позволяет оценить динамические характеристики поверяемых средств измерений и определить динамическую погрешность.

5.3. Способы определения объема поверяемых параметров средств измерений

Трудозатраты по метрологическому обеспечению СИ наряду с периодичностью поверки в значительной степени определяются объемом поверочных работ. Под объемом поверки понимается совокупное число измерений, осуществляемых для определения пригодности СИ к применению. Число измерений обуславливается: числом МХ, подлежащих поверке; числом поверяемых значений величин (точек, отметок на шкале прибора) в диапазоне измерений, необходимым для поверки одной МХ; числом измерений значений величин в каждой точке (отметке шкалы). Измеряемые величины образуют совокупность параметров, подлежащих поверке, в дальнейшем – поверяемые параметры.

Число поверяемых МХ определяется количеством измерительных функций СИ. Число поверяемых отметок определяется характером изменения поверяемой МХ. Необходимое число измерений в каждой поверяемой отметке диапазона измерений СИ определяется возможным разбросом случайной составляющей погрешности прибора.

Состав поверяемых параметров определяется разработчиком СИ при разработке методики (инструкции) по поверке, которая, как правило, является разделом технического описания на прибор. В методике по поверке должен определяться минимум поверяемых МХ, достаточный для решения вопроса о пригодности поверяемого СИ к применению. При проведении государственных приёмочных испытаний вновь разработанных СИ должно проверяться обоснование состава поверяемых параметров.

При обосновании объема первичной и периодической поверки СИ применяются следующие методы:

- расчётный;
- расчётно-экспериментальный;
- экспериментальный.

Расчётный метод применяют для СИ единичного производства, когда проведение экспериментальных исследований требует условий, повторение которых невозможно или связано со значительными затратами. При применении этого метода определяют зависимости изменения расчётной погрешности СИ от измеряемой величины.

Расчётно-экспериментальный метод используется на стадии изготовления опытных образцов СИ или установочной серии. При применении этого метода предварительно определяется вид (аналитическое выражение) зависимости изменения погрешности от измеряемой величины. Далее при экспериментальных исследованиях уточняются параметры расчётной зависимости.

Экспериментальный метод используется на этапе изготовления опытных образцов СИ, когда имеется возможность проведения многократных проверок (градуировок) исследуемого прибора.

Выбор поверяемых параметров, адекватно характеризующих техническое состояние СИ, является сложной и ответственной задачей при разработке методики поверки. На первом этапе разработчик методики по поверке определяет полную «исходную» совокупность параметров, которые могут быть включены в состав поверяемых. В первую очередь в исходную совокупность включаются МХ, значения, которые нормируются в техническом задании на разработку СИ.

Процедура поверки, регламентированная в действующей НТД, предполагает отбракование СИ, если хотя бы один из поверяемых параметров не в допуске. Такая стратегия принятия решения по результатам поверки фактически допускает предположение о стохастической независимости поверяемых параметров. Допущение о независимости поверяемых параметров вполне оправдано при предварительном анализе характеристик СИ, т.к. это допущение повышает (уже сточает) требования к достоверности поверки всего прибора в целом.

В настоящее время при установлении состава метрологических характеристик, подлежащих определению в процессе поверки СИ, используются методы, основанные следующих критериях:

- оценке распределения погрешности СИ в диапазоне измерения;
- учёте функционального назначения СИ.

Метод определения объёма контролируемых параметров на основе учёта функционального назначения СИ применяется в тех случаях, когда СИ при измерениях не используется на всех пределах, диапазонах, для которых оно предназначено. Так, при определении состава поверяемых параметров СИ, используемого не во всем диапазоне измерений, определяются границы (X_n , X_e) используемого диапазона:

$$X_n = N - (|\delta_n| + 3\sigma_{\text{max}}); \quad X_e = N + (|\delta_n| + 3\sigma_{\text{max}}), \quad (5.1)$$

где N – номинальное значение поверяемого параметра СИ; σ_{tex} – среднеквадратическое отклонение измеряемого параметра СИ; δ_n – допуск на измеряемый параметр.

Одним из распространённых методов выбора поверяемых значений в диапазоне измерений является метод оценки функции погрешности, воспроизведенного в виде дискретного ряда. Метод основывается на теореме отсчётов Котельникова, гласящей: если функция $\Delta(X)$ не содержит частот выше F_m (Гц), то она полностью определяется последовательностью своих значений в моменты, отстоящие друг от друга на $1/2F_m$.

Теоретически или экспериментально устанавливают функцию распределения погрешности в диапазоне измерений (Рисунок 6).

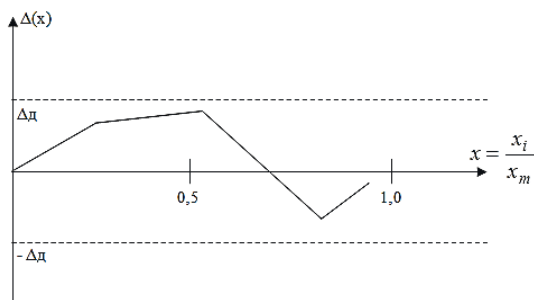


Рисунок 6 – Функция распределения погрешности $\Delta(X)$

При выборе число точек в диапазоне измерений можно определить способом анализа гармонических составляющих кривых (функцией распределения) систематических погрешностей. Способ определения числа точек на основе гармонического анализа является достаточно общим и распространяется на СИ как с периодическими систематическими погрешностями, так и систематическими погрешностями иного характера. В процессе анализа осуществляется оценка значимости её гармонических составляющих.

Найдем разложение кривой погрешности в ряд Фурье на интервале значений X от нуля до единицы. При этом $X = X_i / X_m$ – отношение номинального измеренного значения погрешности в проверяемой точке к верхней границе диапазона воспроизведения условий испытаний поверяемого СИ.

В соответствии с [2] в нашем случае

$$\Delta(X) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k * \cos k\pi X, \quad (5.2)$$

где a_k – коэффициенты ряда Фурье, определяющиеся по формуле

$$a_k = \int_0^1 \Delta(X) * \cos(k\pi X) dx. \quad (5.3)$$

Далее вычисляют числовые значения коэффициентов ряда для $\Delta(X)$ и находят номер j коэффициента a_j , который не превышает или равен половине допускаемого значения погрешности (по абсолютной величине) с учётом коэффициента запаса точности k_m в интервале между двумя соседними проверяемыми точками:

$$a_n \leq \frac{\Delta_d}{K_t}. \quad (5.4)$$

Назначают $j+1$ проверяемых точек, из которых две должны соответствовать началу и концу диапазона измерений, а остальные должны быть равномерно распределены в указанном диапазоне.

Пусть выражение для функции погрешности СИ для измерения температуры имеет вид:

$$\Delta(X) = a + bX + cX^2 \quad (^\circ C). \quad (5.5)$$

Значение коэффициентов соответственно:

$$a = 50 \text{ } ^\circ C$$

$$b = 40$$

$$c = -200 \text{ } ^\circ C^{-1}$$

Подставив данные значения, получим значение амплитуды гармонических составляющих функции погрешности.

Гармоника (к)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амплитуда ($^\circ C$)	9	64	-20	-7	-5	3	-2	1	-1	1	-1

Пусть допустимое значение погрешности СИ $\Delta_d = \pm 10 \text{ } ^\circ C$, а значение коэффициента запаса точности $k_m = 2$.

Тогда согласно изложенному правилу, j выбрано из условия

$$|a_j| \leq \Delta_d / 4 = 2,5 \text{ } ^\circ C.$$

Амплитуды гармоник с номерами 4 и выше пренебрежительно малы по сравнению с пределом допускаемых значений погрешности. Из таблицы следует $j = 5$. Таким образом, в рассматриваемом примере должно быть назначено шесть проверяемых точек, равномерно распределённых в диапазоне измерений.

Одним из распространённых способов определения числа проверяемых точек является подход на основе учёта корреляционной зависимости между значениями погрешностей в смежных точках диапазона измерений конкретного СИ. При этом кривая распределения погрешности рассматривается как реализация случайной функции $\Delta(X)$. Далее определяется автокорреляционная функция для различных значений ΔX (Рисунок 7).

$$K_x(\Delta X) = \frac{1}{X_m - \Delta X} \cdot \int_0^{X_m - \Delta X} \Delta(X) \cdot \Delta(X + \Delta X) dX, \quad (5.6)$$

где $X = 0, 1$; ΔX – интервал случайной функции ΔX .

Общий ход функции $K_x(\Delta X)$ воспроизводится по отдельным точкам $0, \Delta X, 2 * \Delta X, 3 * \Delta X, \dots$.

$D_x = K_x(\Delta X=0)$ – дисперсия случайной функции $\Delta(X)$.

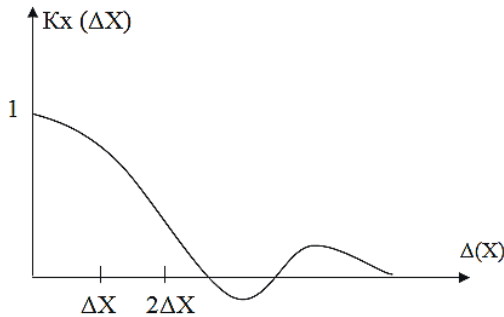


Рисунок 7 – Общий вид автокорреляционной функции $\Delta(X)$

Теоретические и экспериментальные исследования [2,6,7] показали, что в том случае, когда существует тесная корреляционная связь, например, коэффициент корреляции $r_x(\Delta X) = K_x(\Delta X) / D_x \geq 0,8$

между значений метрологических характеристик в проверяемых точках, то эти точки можно исключить из числа проверяемых.

Нормативные документы на разработку методик по проверке средств измерений требуют определять минимум проверяемых метрологических характеристик, достаточный для решения вопроса о пригодности проверяемых средств измерений к применению.

В настоящее время выбору контролируемых параметров технических систем посвящено значительное число работ [2,6,8], многие из которых отличают оригинальные подходы, успешно применяемые на практике. Вместе с тем, как показывают метрологические экспертизы средств измерений и методик поверки, ещё имеют место случаи необоснованного выбора проверяемых параметров. Это можно объяснить в первую очередь тем, что до недавнего времени не было общих регламентирующих документов на задание требований к достоверности поверки, а также большим разнообразием типов эксплуатируемых приборов, для которых сложно применять достаточно общие методы анализа.

Анализ существующих подходов к определению состава проверяемых параметров показал, что наиболее распространены способы, основанные на обеспечении апостериорной надежности контролируемых технических систем. К ним можно отнести многочисленные методы ранжирования параметров по уровню их надежности [2,6]. Однако при этом трудно определять характеристики надежности анализируемых параметров на этапе разработки средства измерений. Поэтому объём операций при первичной поверке, как правило, больше, чем при периодической поверке прибора.

Разработка методических основ для определения состава проверяемых параметров является важной задачей, имеющей практическое значение для метрологического обслуживания средств измерений. Решим такую задачу для средства измерений. Поскольку достоверность поверки средства измерений в значительной мере определяется проверяемыми параметрами, то рациональный их состав следует сформировать с учётом обеспечения требуемых показателей достоверности поверки α_0 и β_0 . Если в исходной совокупности параметров средства измерений x_1, x_2, \dots, x_n лишь часть параметров $i = \overline{1, l}$ ($l \leq n$) подлежит измерительному контролю, то при условии независимости погрешностей измерений отдельных параметров значения условных

вероятностей ошибок поверки α_0 и β_0 для многопараметрического контроля определяется по следующим формулам [2]:

$$\alpha_0 = 1 - \prod_{i=1}^l (1 - \alpha_i),$$

$$\beta_0 = \frac{\prod_{i=1}^l [P(x_i)(1 - \alpha_i) + P(x_i)\beta_i] - \prod_{i=1}^l P(x_i)(1 - \alpha_i)}{1 - \prod_{i=1}^l P(x_i)} \pi + (1 - \pi) \prod_{i=1}^l (1 - \alpha_i),$$

где $\pi = \left(1 - \frac{\prod_{i=1}^l P(x_i)}{1 - P_{нк} \prod_{i=1}^l P(x_i)} \right)$ – полнота контроля, под которой понимают методическую составляющую достоверности поверки, характеризующую возможность выявления отказов при выбранной методике поверки; $P_{нк}$ – вероятность безотказной работы неконтролируемой части средства измерений.

Значения α_i и β_i определяются по выражениям (5.25) и (5.26).

Допущение о стохастической независимостиверяемых параметров вполне оправдано на этапе предварительного анализа характеристик средств измерений, т.к. оно ужесточает требования к достоверности измерительного контроля.

На первом этапе анализа параметровверяемого средства измерений следует определить α_i , обеспечиваемое образцовыми приборами и поверочным оборудованием, которые можно использовать при поверке. Затем для всей совокупности параметров проверяется выполнение условий $\alpha_0 \leq \alpha_d$. Если это условие обеспечивается, то, как следует из (5.6), дальнейшее сокращение числаверяемых параметров будет лишь уменьшать ошибку ложного забракования по результатам поверки прибора.

Если в ТЗ на разработку средств измерений или в соответствующей НТД на его поверку задаются допустимые значения условных вероятностей α_d , β_d , то при выбореверяемых параметров целесообразно учитывать методическую достоверность измерительного контроля [2].

Требуемые α_0 и β_0 можно обеспечить изменением числаверяемых параметров или значений α_i и β_i при измерительном контроле

отдельных параметров. Вполне очевидно, что увеличение числа проверяемых параметров и уменьшение значений α_i и β_i связано с дополнительными затратами на повышение точности поверочного оборудования, учёт влияния дополнительных факторов и т.д. В основу рассматриваемого способа выбора проверяемых параметров положен тот факт, что снижению ошибок измерительного контроля сопутствуют некоторые затраты (материальные, временные), которые рассматриваются как неотрицательная монотонная функция. За такую функцию можно принять следующее математическое выражение

$$C_i = N_i (1 - \beta_i) / (\alpha_i + \beta_i), \quad (5.7)$$

где N_i – весовой коэффициент затрат контроля i – го параметра.

Функция (5.7) обладает следующими свойствами. При отсутствии контроля, т.е. при $\beta_i = 1$, она минимальна, а при повышении достоверности контроля её значение возрастает. Функцию затрат многопараметрического контроля естественно представить в виде суммы затрат контроля отдельных параметров

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n N_i \frac{1 - \beta_i}{\alpha_i + \beta_i}.$$

Вполне очевидно, что лучше та совокупность измеряемых параметров, для которой при требуемых показателях α_0 и β_0 метрологического обеспечения средние затраты меньше. Как уже отмечалось, допустимые значения α_0 , β_0 можно обеспечить, как варьируя число проверяемых параметров, так и повышая достоверность контроля отдельных параметров. Поэтому целесообразно найти оптимальное соотношение между уровнем достоверности и числом проверяемых параметров. Эту оптимизационную задачу можно решить методом неопределённых множителей Лагранжа. Составим функцию Лагранжа в виде

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{N_i(1 - \beta_i)}{\alpha_i + \beta_i} + \lambda(\beta_0 - \beta_d), \quad (5.8)$$

где λ – неопределённый множитель Лагранжа.

Первое слагаемое в (5.8) возрастает с увеличением числа проверяемых параметров, при этом второе слагаемое уменьшается. В этом

случае необходимо найти условные экстремумы функции (5.8) при ограничениях $\beta_0 \leq \beta_d$, $\alpha_0 \leq \alpha_d$.

Поскольку методическая достоверность измерительного контроля в основном определяется ошибками β_i , то, чтобы найти условные минимумы функции F , вычислим частные производные $\partial F / \partial \beta_i$, приравняем их к нулю и получим систему из n уравнений:

$$\frac{\partial F}{\partial \beta_i} = \frac{N_i(1 + \alpha_i)}{(\alpha_i + \beta_i)} + \lambda \pi \frac{\prod_{i=1}^n [F(x_i)(1 - \alpha_i) + P(x_i)\beta_i]}{1 - \prod_{i=1}^n P(x_i)} \times \frac{P(x_i)}{P(x_i)(1 - \alpha_i) + P(x_i)\beta_i} = 0;$$

$$i = 1, n. \quad (5.9)$$

Для решения системы (5.9) введём дополнительное уравнение связи

$$\beta_0 - \beta_d = 0. \quad (5.10)$$

Решение системы уравнений (5.9), (5.10) представляет собой искомые значения оптимальных значений β_i для исследуемой группы параметров. Очевидно, что при $\beta_i \approx 1$ имеет место ситуация, когда i -й параметр не нуждается в контроле и из выбираемой совокупности исключается. Таким образом, определяемая совокупность проверяемых параметров будет состоять из $l \leq n$ членов.

При исследовании большой группы параметров решить систему уравнений (5.9), (5.10) достаточно трудно. В этом случае целесообразно применить метод последовательных приближений для определения требуемых значений β_i при соответствующих ограничениях на измерительный контроль.

Для ускорения процедуры выбора необходимо предварительно ранжировать параметры одним из способов, например, на основе использования коэффициентов значимости N_i . Соответствующий весовой коэффициент N_i для функции затрат в методе последовательных приближений равен $1/K_i$ [2], где

$$K_i = \frac{1}{P(X_i)} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{P(X_i)}.$$

При необходимости обеспечить другие показатели, например, требуемую глубину контроля параметров для диагностирования отка-

зов поверяемых приборов или прогнозировать их техническое состояние, можно использовать другие критерии оптимизации и соответственно определить другой состав поверяемых параметров. При этом часть поверяемых параметров можно охватить встроенной системой контроля.

5.4. Способы определения периодичности поверки средств измерений

Для поддержания СИ в исправном состоянии в процессе эксплуатации осуществляется их периодическая поверка в органах Метрологической службы (лабораториях и базах измерительной техники, контрольно-измерительных пунктах и т.п.). Периодическая поверка СИ проводится через определённые межповерочные интервалы (МПИ). При периодической поверке МПИ устанавливаются для СИ:

- подлежащих обязательной государственной поверке, – непосредственно Росстандартом или органами государственной метрологической службы;
- подлежащих ведомственной поверке, ведомственной метрологической службой.

Длительность межповерочных интервалов устанавливается в зависимости от надёжности СИ, условий эксплуатации, интенсивности их использования и требуемого уровня апостериорной надёжности поверенного прибора. В настоящее время при установлении длительности МПИ используются в основном три подхода: экономический, технико-эксплуатационный и смешанный.

При экономическом подходе длительность МПИ определяется из условий минимизации экономических затрат, связанных с обслуживанием и применением неисправных СИ [2] МПИ определяется из условия

$$\tau_{\text{мпи}} = \min \{C_0(\tau_{\text{мпи}}) + C_{\text{п}}(\tau_{\text{мпи}})\}, \quad (5.11)$$

где $\tau_{\text{мпи}}$ – вектор МПИ; $C_0(\tau_{\text{мпи}})$ – затраты, связанные с обслуживанием (поверкой) СИ; $C_{\text{п}}(\tau_{\text{мпи}})$ – затраты, связанные с применением неисправных СИ.

Для реализации этого подхода необходимы сведения о затратах, обусловленных применением неисправных СИ при выполнении измерений, что на практике наиболее сложно.

В частном случае можно полагать, что материальный ущерб от применения неисправных СИ пропорционален вероятности их отказа за τ . При экспоненциальном законе безотказной работы это значение составит

$$C_{п}(\tau) = C_{п}(1 - e^{-\lambda\tau}), \quad (5.12)$$

где $C_{п}$ – априорные затраты, связанные с применением неисправных СИ до их очередной поверки; λ – интенсивность отказов СИ.

Обычно известна стоимость поверки C_0 эксплуатируемых приборов и средний срок их службы $T_{сл}$. В этом случае затраты, связанные с обслуживанием СИ, определяются из очевидного соотношения

$$C_0(\tau) = C_0 \frac{T_{сл}}{\tau}, \quad (5.13)$$

где отношение $\frac{T_{сл}}{\tau}$ – число периодических поверок за срок службы СИ.

Обозначим общие затраты, связанные с обслуживанием и применением неисправных СИ

$$\Pi = C_0 \frac{T_{сл}}{\tau} + C_{п}(1 - e^{-\lambda\tau}). \quad (5.14)$$

С учётом выражения (5.12) минимизируем Π , приняв частную производную $\frac{\partial \Pi}{\partial \tau} = 0$. Тогда

$$\Pi' = -C_0 \frac{T_{сл}}{\tau^2} + C_{п}\lambda = 0.$$

Для предварительных расчётов предположим $C_0 = C_{п}$. В этом случае

$$\tau = \sqrt{\frac{T_{сл}}{\lambda}}. \quad (5.15)$$

Значения $T_{сл}$, λ , как правило, приведены в формулярах приборов и в справочниках, выпускаемых СИ. Например, для электронного вольтметра типа ВЗ-59: $T_{сл} = 10$ лет; $T_0 = 1/\lambda = 5000$ ч.

Учитывая, что 1 год = 87600 ч., оптимальная длительность МПИ при минимизации экономических затрат с учётом принятых значений составит

$$\tau = \sqrt{87600 \cdot 5000} = 21000 \approx 2,5 \text{ года.}$$

Наибольшее распространение получил технико-эксплуатационный подход, который основан на обеспечении требуемых значений показателя состояния СИ на конец МПИ. В этом случае МПИ определяется из условия

$$P(\tau) \geq P(\tau)_д, \quad (5.16)$$

где $P(\tau)$ – значение показателя состояния СИ, определяемое по результатам эксплуатации за время τ ; $P(\tau)_д$ – допустимое значение показателя состояния СИ.

В качестве такого показателя состояния СИ на практике используется вероятность $P_r(\tau)$ сохранения значений МХ в заданных пределах в течение МПИ или нестационарный коэффициент готовности $K_r(\tau)$ СИ, т.е. показатели прибора.

Для вычисления $K_r(\tau)$ используется следующее выражение:

$$K_r(\tau) = \frac{\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}}\right)(\tau + T_0) + \tau - 2\tau \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}}\right)}{\tau \left[1 + \frac{\beta \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}}\right)}{1 - \beta}\right] + \left[\frac{\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}}\right)}{1 - \beta} + e^{-\frac{\tau}{T_0}}\right] \tau_{п} + T_{в} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}}(1 - \alpha)\right)}, \quad (5.17)$$

где T_0 – наработка на отказ; α , β – условные вероятности ложного и необнаруженного отказов, характеризующие достоверность поверки; $\tau_{п}$ – продолжительность поверки; $T_{в}$ – продолжительность восстановления.

Оптимальный период МПИ определяется из условия минимизации K_r . Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial K_r(\tau)}{\partial \tau} &= 0 \\ \frac{\partial K_r^2(\tau)}{\partial \tau^2} &\leq 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5.18)$$

В основе большинства подходов нормирования МПИ предполагается экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы с нормальным распределением погрешностей во временных «сечениях» процесса эксплуатации.

В этих случаях вероятность сохранения значений МХ в заданных пределах за МПИ определяется по формуле

$$P_M(\tau) = e^{-\frac{\tau}{T_{ом}}}, \quad (5.19)$$

где $T_{ом}$ – наработка СИ на метрологический отказ.

При назначении первичного МПИ значение $T_{ом}$ в зависимости от значения показателя надежности, приведенного в технической документации на СИ, определяется по выражению

$$T_{ом} = -\frac{\tau}{8760(K_n + 0.01)\varepsilon \ln P_M(\tau)}, \quad (5.20)$$

где K_n – коэффициент использования СИ; ε – коэффициент метрологических отказов.

В этом случае МПИ определяется по формуле

$$\tau = -T_{ом} \ln P_M(\tau)_{тр}. \quad (5.21)$$

Требуемый уровень метрологической надежности ($P_M(\tau)_{тр}$, $K_r(\tau)_{тр}$) зависит от целей применения СИ и выбирается из условия обеспечения необходимой эффективности обслуживаемых технических объектов.

Смешанный подход к назначению МПИ заключается в комбинации результатов оценки МПИ, полученных на основании экономического и технико-эксплуатационного подходов [2,6]. Смешанный подход может быть использован только тогда, когда исходные дан-

ные позволяют оценить МПИ как экономического, так и технико-эксплуатационного подходов.

При эксплуатации СИ допускается производить корректировку их МПИ. В качестве критерия корректировки обычно используют единую долю приборов, признанных негодными при поверке ε .

Другими словами, продолжительность МПИ устанавливается с таким расчётом, чтобы при очередной поверке оказались исправными не менее $(1 - \varepsilon) \cdot 100\%$ всех СИ.

В практической метрологии используют коэффициент метрологической годности $K_d = 1 - \varepsilon$, который определяется от степени важности выполняемых измерений. Так, для СИ, обеспечивающих учёт продукции, выполнения технических измерений, K_d принимается равным 0,8...0,85. Для СИ, используемых для оценки качества продукции, допустимый коэффициент метрологической годности повышается до 0,9...0,98. Наконец, для приборов, выполняющих особо ответственные измерения, например, связанные с безопасностью, K_d принимается равным 0,99...0,995.

По результатам периодических проверок определяют правильность назначения МПИ путём выполнения неравенства, как правило, с доверительной вероятностью $P = 0,9$ [6].

$$\varepsilon_d - 1,28 \sqrt{\frac{\varepsilon_d(1 - \varepsilon_d)}{N}} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_d + 1,28 \sqrt{\frac{\varepsilon_d(1 - \varepsilon_d)}{N}}, \quad (5.22)$$

где N – число проверок, при которых обнаружен брак; ε_d – допустимый уровень бракуемых СИ ($1 - \varepsilon_d = K_d$).

Если неравенство выполняется, МПИ оставляют без изменений, если же не выполняется, то устанавливается новое τ_2 значение МПИ

$$\tau_2 = \tau_1 \frac{\ln(1 - \varepsilon_q)}{\ln(1 - \varepsilon)}, \quad (5.23)$$

где τ_1 – первичный МПИ (до корректировки).

5.5. Достоверность поверки средств измерений

Совершенство системы метрологического надзора за единством средств измерений определяется качеством поверки. Одной из важнейших характеристик качества поверки является достоверность. Эта

характеристика процесса измерительного контроля отражает степень доверия к полученным после поверки результатам. На её формирование влияет большое количество факторов. Наиболее существенными из них являются точность измерительного контроля, полнота контроляверяемых параметров, временные показатели поверки, надежностьверяемых и образцовых средств измерений, установление поля допуска наверяемый параметр, методика операций поверки, способы регистрации и обработки измерительной информации, наличие системы самоконтроля.

Достоверность поверки по результатам измерительного контроля численно определяют как вероятность принятия правильного решения о техническом состоянии прибора. В частности, при однопараметрическом измерительном контроле достоверность поверки [2]/

$$D = 1 - P_i(x)\alpha_i - P_i(x)\beta_i, \quad (5.24)$$

где $P_i(x)$, $P_i(x)$ – вероятности нахождения значения 1-говеряемого параметра в момент измерения в поле допуска и вне поля допуска; α_i , β_i – условные вероятности ложного и необнаруженного отказов при поверке прибора.

При независимостиверяемых параметров [2].

$$\alpha_i = \frac{\int_{\Delta_{ни}}^{\Delta_{ви}} f_i(x) dx - \int_{\Delta_{ни}}^{\Delta_{ви}} f_i(x) \int_{\Delta_{ни}-x}^{\Delta_{ви}-x} f_i(z) dz dx}{\int_{\Delta_{ни}}^{\Delta_{ви}} f_i(x) dx}, \quad (5.25)$$

$$\beta_i = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f_i(x) \int_{\Delta_{ни}-x}^{\Delta_{ви}-x} f_i(x) dz dx - \int_{\Delta_{ни}}^{\Delta_{ви}} f_i(x) \int_{\Delta_{ни}-x}^{\Delta_{ви}-x} f_i(z) dz dx}{1 - \int_{\Delta_{ни}}^{\Delta_{ви}} f_i(x) dx}, \quad (5.26)$$

где $f_i(x)$ – плотности распределения i-говеряемого параметра; $f_i(z)$ – плотности распределения погрешности измерения i-го параметра; $\Delta_{ви}$, $\Delta_{ни}$ – верхнее и нижнее значения поля допусковверяемого параметра.

В принятой в настоящее время поверочной практике результат поверки средства измерения имеет два альтернативных состояния

«годен», «не годен». Первое характеризует техническое состояние прибора, у которого всеверяемые параметры в норме (соответствуют НТД), второе – состояние, при котором хотя бы один из параметров не в норме.

Чаще всего при поверке средств измерений определяют относительную погрешность вверяемой отметке диапазона измерений. Поэтому в качестве контролируемой характеристики, как правило, используют отношение значения вверяемой метрологической характеристики x к модулю её предельного допустимого значения $|x_d|$, т. е. $\chi = x / |x_d|$. В связи с этим многие поверочные установки и приборы для удобства работы поверителя имеют отсчётные устройства, проградуированные в относительных единицах.

Для упрощения оценки достоверности поверки целесообразно воспользоваться понятием оперативной характеристики контроля, применяемой для проверки статистических гипотез. В этом случае условная вероятность признания вверяемого средства измерений годным при условии, что χ имеет некоторое конкретное значение, т.е. оперативная характеристика контроля (рис. 8) [2]

$$L(x) = \int_{-x_d}^{x_d} f(x/x_0) dx$$

где $f(x/x_0)$ – условная (при условии, что контролируемая характеристика приняла конкретное значение x_0) плотность распределения вероятностей относительной оценки $\chi = x/|x_d|$; $x_d = x/|x_d|$ – нормализованная граница x_d поля допуска, с которой сравнивается оценка x для принятия решения о годности или забраковании вверяемого прибора ($\chi_d \leq 1$).

За критерии достоверности поверки целесообразно принять наибольшую условную вероятность β_d ошибочного признания годным в действительности негодного средства измерения либо наибольшую условную вероятность α_d ошибочного признания негодным фактически годного средства измерений. Критерию β_d соответствует ордината функции $L(x)$ в точке $x = 1$, являющейся наибольшей из тех, которые могут иметь место при $x > 1$, т.е. $\beta_d = L(x)$ в точке $x = 1$.

Следует отметить, что в общем случае оперативная характеристика зависит от качества методики поверки, определяемого некоторым вектором параметров a , т.е. $L(x, a)$. Поэтому для более полной

оценки достоверности различными методиками поверки следует конкретизировать вид функции $L(x, a)$ [2].

При разработке методик поверки средств измерений, а также при метрологической экспертизе и испытаниях приборов необходимо задавать и контролировать показатели достоверности поверки, обеспечиваемые данной методикой. При этом возникают трудности нормирования и контроля ошибок поверки (α_D и β_D), которые обусловлены тем, что на этапе разработки средств измерений, как правило, отсутствуют априорные данные о распределениях параметров, а также результаты периодических поверок.

Из-за отсутствия данных об эксплуатации вновь выпускаемых средств измерений показатели достоверности первичной поверки обычно отличаются от показателей периодической поверки. Это обусловлено совершенством технологии изготовления, её стабильностью.

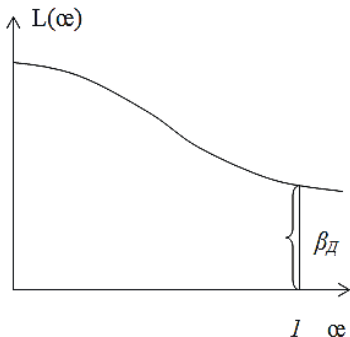


Рисунок 8 – Оперативная характеристика контроля

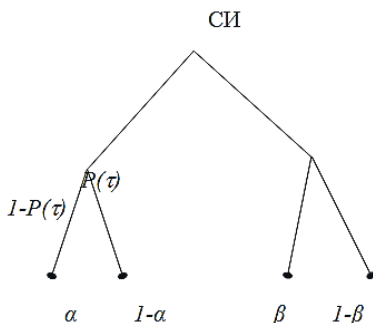


Рисунок 9 – Граф состояний средств измерений и ошибок поверки

Рассмотрим один из способов определения показателей достоверности α_d , β_d для первичной поверки, основанный на связи с показателями качества выпускаемой продукции. За показатель качества выпускаемой продукции принято максимально допустимое относительное число C дефектных средств измерений, которые ошибочно проходят контрольные испытания, включая первичную поверку, с положительным результатом. Возможность таких ошибочных решений связана с наличием ошибок измерительного контроля, воздействия неконтролируемых внешних факторов. Характеристикой качества изготовленных средств измерений, поступающих на выходной контроль из сборочных цехов, принимают относительное число Q дефектных средств измерений из всех изготовленных. При этом на предприятиях, выпускающих измерительную технику, под Q понимают дефектность лишь в отношении метрологических характеристик.

Вполне очевидно, что относительное число C дефектных средств измерений среди выпускаемых как исправные определяют не только вероятностью ошибки β , но и показателями качества производства Q , т.е. априорной вероятностью наличия дефектной продукции.

Применяя к рассматриваемой ситуации формулу Байеса, по аналогии с формулами, приведёнными в [2], получаем в наших обозначениях:

$$\left. \begin{aligned} a &= (1 - Q)\alpha + Q(1 - \beta), \\ C &= \frac{Q\beta}{Q\beta + (1 - Q)(1 - \alpha)}, \end{aligned} \right\} \quad (5.27)$$

где a – относительное число средств измерений, забракованных при первичной поверке.

В (5.27) $(1 - Q)\alpha$ – относительное число ошибочно забракованных средств измерений, а $Q(1 - \beta)$ – относительное число правильно забракованных приборов.

Как известно, в соответствии с производственной ситуацией технология изготовления изделий не остается постоянной. Следовательно, значение Q , связанное с качеством производства, также не остается постоянным и даже для одних и тех же типов средств измерений, изготавливаемых на разных предприятиях, может быть различным. Для поддержания показателей качества C_0 , Q_0 , a_0 выпускаемых средств измерений требуется обеспечить следующие значения достоверности первичной поверки (5.27):

$$\alpha_d = \frac{a_0 - Q + C_0(1 - a_0)}{1 - Q_0}, \quad \beta_d = \frac{C_0(1 - a_0)}{Q_0},$$

где C_0 – заданный уровень выходного качества.

В техническом задании (ТЗ) или технических условиях (ТУ) на разработку средства измерений задают лишь показатели безотказной работы прибора или комплексные показатели надежности. В связи с этим целесообразно предварительно определить ориентировочные значения α_d^* и β_d^* в зависимости от обеспечения требуемых показателей надежности средства измерений и далее по результатам статистических данных уточнить их значения. Если в ТЗ на разработку прибора задаётся вероятность безотказной работы $P(\tau)$ за межповерочный интервал τ при определённом коэффициенте использования k_n , то показатели α_d и β_d можно определить, рассмотрев процедуру поверки с двумя альтернативными исходами. При отрицательных результатах поверки метрологические органы принимают решение об исключении из эксплуатации забракованных приборов. Вместо них используют резервные, т.е. процедура поверки влияет на надежность парка средств измерений.

Таким образом, вероятность безотказной работы средств измерений характеризуется фактически исправным его состоянием и результатами поверки, определяющими отказы. Анализируя граф состояний (Рисунок 9), можно записать выражения для вероятности безотказной работы на момент окончания поверки:

$$P(t) = P(\tau)(1 - \alpha) + P(\tau)\alpha + [1 - P(\tau)](1 - \beta) = 1 - [1 - P(\tau)]\beta. \quad (5.28)$$

Как правило, у современных средств измерений проверяют несколько метрологических характеристик. При этом наиболее часто применяют методику, когда в определённом порядке для каждой метрологической характеристики (поверяемой точки) проверяют гипотезы о годности прибора и, если они не опровергаются для всех метрологических характеристик, то средство измерений признают годным. В этом случае

$$P(\tau) = \prod_{i=1}^n P_i(\tau),$$

где n – число проверяемых метрологических характеристик (точек) средства измерений; $P_i(\tau)$ – вероятность отсутствия брака по i -й метрологической характеристике.

При этом обычно для анализа используют модель системы обслуживания и восстановления технических объектов, в которой при отрицательных результатах поверки забракованные приборы заменяют на исправные, т.е. для парка средств измерений считают, что на момент окончания поверки апостериорная вероятность признания прибора исправным становится равной единице [2]. Необходимо отметить, что такая модель значительно идеализирована, т.к. не учитывает ошибки поверки средств измерений. Вследствие этого вероятность признания исправного состояния средства измерений в момент окончания поверки не может принимать значение, равное единице, а оказывается несколько ниже.

Если в ТЗ на разработку средств измерений или в соответствующей НТД задается требуемое $P_{TP}(t)$, то необходимое значение β_d^* определяется из выражения (5.28).

Значения $P_{TP}(t)$ можно задавать с учётом оснащённости поверочного органа образцовыми приборами и коэффициента метрологической годности k_d , который определяется в зависимости от условий применения поверяемого прибора. В методических указаниях [6], утвержденных Госстандартом, приводятся значения k_d для приборов, условно разделённых на три группы важности. Для приборов, обеспечивающих расчёты с потребителями, $k_d = 0,80 \dots 0,85$. Для приборов, применяемых при техническом обслуживании в технологических процессах, $k_d = 0,90 \dots 0,98$. Для приборов, выполняющих особо ответственные измерения, например, связанные с безопасностью людей, предлагается $k_d = 0,99 \dots 0,995$. В этом случае значение β_d определяется из (5.28), где $P(t)$ принимается равным соответствующему $P_{TP}(t)$. В этом случае $\beta_d^* = (1 - P_{TP}(t)) / (1 - P(t))$.

Известно, что поверка средств измерений повышает, с одной стороны, достоверность оценки их технического состояния, а с другой стороны, время, затрачиваемое на подготовку прибора к применению. Причём на показатели надёжности, связанные с готовностью средства измерений к применению, существенно влияют ошибки поверки 1-го рода. Поэтому требуемое значение α_d следует определять из комплексных показателей надёжности, учитывающих время восстановления забракованного прибора, например, коэффициента готовности

$$K_G = T_0 / (T_0 + T_B),$$

где T_B – среднее время восстановления средства измерений;
 T_0 – наработка на отказ.

При постоянной интенсивности отказов λ по аналогии с (5.17)

$$K_G = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{(1 - e^{-\lambda\tau}) \left(e^{-\lambda\tau} + \frac{\lambda\tau}{1 - \beta} \right) + \lambda t_k \left[1 + \frac{\beta}{1 - \beta} (1 - e^{-\lambda\tau}) \right] + \lambda T_B [1 - e^{-\lambda\tau} (1 - \alpha)]}, \quad (5.29)$$

где t_k – длительность поверки.

Значение K_G , как правило, задают в ТЗ на разработку средства измерений или рассчитывают по заданным T_0 и T_B . Приняв $\beta = \beta_d^*$, из (5.29) определяют α , значение которого принимают за α_d^* . Далее по результатам испытаний (предварительным, определительным, приёмным) или опытной эксплуатации прибора значения α_d^* , β_d^* уточняют из апостериорного распределения поверяемых параметров.

5.6. Государственная система обеспечения единства измерений и ее законодательная база

Единство измерений – это характеристика качества измерений, заключающаяся в том, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам воспроизводимых единиц, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы.

Основы Государственной системы обеспечения единства измерений устанавливает ГОСТ Р 8.000-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения» [14].

В соответствии с п. 3.1. ГОСТ Р 8.000-2015 обеспечение единства измерений (ОЕИ) – это деятельность, направленная на установление и применение научных, правовых, организационных и технических основ, правил, норм и средств, необходимых для достижения состояния 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.

В соответствии с п. 3.2. ГОСТ Р 8.000-2015 система обеспечения единства измерений – это совокупность субъектов, норм, средств и видов деятельности, предназначенная для обеспечения единства измерений.

Совокупность всех организационных элементов и видов деятельности, связанных с решением задач по обеспечению единства измерений и метрологическому обеспечению, объединяется в Государственную систему обеспечения единства измерений (далее – ГСИ) [14].

Целью ГСИ является создание правовых, нормативных, организационных, методических, технических и экономических условий для решения задач в области обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения.

Деятельность по ОЕИ осуществляется в соответствии с Конституцией Российской Федерации (ст. 71р); Законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений»; постановлениями Правительства Российской Федерации; ГОСТ Р 8.000-2015г. и НТД по обеспечению единства измерений, принимаемыми и утверждаемыми Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), другими ФОИВ, предприятиями и организациями.

Обеспечение единства измерений в стране осуществляется на государственном уровне, уровне федеральных органов исполнительной власти (ФОНВ), юридического лица и индивидуального предпринимателя, а также общественных организаций и объединений.

При этом юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями осуществляется и деятельность по метрологическому обеспечению.

Государственное управление деятельностью по ОЕИ выполняет Росстандарт в соответствии с Положением «О Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2004 г. № 294.

Обеспечение единства измерений в пределах установленной ответственности федерального органа исполнительной власти осуществляет его метрологическая служба.

Обеспечение единства измерений в пределах установленной области деятельности юридического лица и индивидуального предпринимателя осуществляет метрологическая служба предприятия (орга-

низации) или иная служба, созданная в добровольном порядке и выполняющая её функции.

Обеспечение единства измерений в пределах установленной области деятельности общественных организаций и объединений осуществляет метрологическая служба объединения (организации) или иная служба, выполняющая её функции.

Государственная система измерений состоит из следующих подсистем:

- научной (фундаментальной и прикладной);
- правовой;
- организационной;
- нормативно-методической;
- технической.

Научная подсистема – комплекс научных организаций их оборудования и результатов фундаментальных и прикладных научных исследований в области ОЕИ.

Правовая подсистема – комплекс взаимосвязанных законодательных актов и нормативных документов, объединённых общей целевой направленностью и устанавливающих согласованные требования к взаимосвязанным объектам деятельности по ОЕИ.

Нормативно-методическая подсистема – совокупность нормативно-методических документов межгосударственного (международного), федерального (государственного), муниципального (регионального), фирменного уровня, а именно технических регламентов, стандартов, программ и методик испытаний (измерений), правил и рекомендаций по ОЕИ.

Техническую подсистему ГСИ составляет совокупность:

- межгосударственных, государственных эталонов и эталонов единиц величин и шкал измерений (ГЭ, РЭ);
- военных эталонов – резерва государственных эталонов – резерва государственных эталонов (ВЭ);
- стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (СО);
- стандартных справочных данных о физических константах и свойств веществ и материалов (ССД);
- средств измерений и испытательного оборудования, необходимого для осуществления метрологического контроля и надзора (СИ, ИО);

- специальных зданий и сооружений для проведения высокоточных измерений в метрологических целях;
- научно-исследовательских, эталонных, испытательных, поверочных, калибровочных и измерительных лабораторий (в т.ч. передвижных) и их оборудования.

Государственная система обеспечения единства измерений					
<i>Подсистема основных норм и правил по обеспечению единства измерений</i>		<i>Правовая подсистема</i>	<i>Организационная подсистема</i>	<i>Нормативно-методическая подсистема</i>	<i>Техническая подсистема</i>
<i>Фундаментальная подсистема</i>	<i>Прикладная подсистема</i>				

Рисунок 10 – Структура Государственной системы обеспечения единства измерений

Организационную подсистему ГСИ составляют следующие метрологические службы и другие службы ОЕИ:

- Государственная метрологическая служба (ГМС);
- иные государственные службы ОЕИ;
- метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц (в т.ч. Метрологическая служба Вооруженных Сил РФ (МС ВС), осуществляющая деятельность по ОЕИ в сфере обороны и безопасности и метрологические службы предприятий оборонно-промышленного комплекса).

В Государственную метрологическую службу входят:

- подразделения центрального аппарата Росстандарта, осуществляющие функции планирования, управления и контроля деятельностью по ОЕИ на межотраслевом уровне;
- государственные научные метрологические центры (ГНМЦ) органы государственной метрологической службы на территориях республик в составе Российской Федерации, автономной области, автономных округов, краев, областей, округов и городов.

К иным государственным службам ОЕИ относятся:

- Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ);
- Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ТССО);
- Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

Во главе системы метрологических документов находятся ФЗ «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ (ред. от 05.04.2016), Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015) и Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» [11, 12, 13].

5.7. Федеральный закон «О техническом регулировании»

Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ (ред. от 05.04.2016) [11] регулирует отношения, возникающие при следующих обстоятельствах:

- разработке, принятии, применении и исполнении обязательных требований к продукции, в т.ч. зданиям и сооружениям (далее – продукция), или к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации;

- применении и исполнении на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также к выполнению работ или оказанию услуг в целях добровольного подтверждения соответствия;

- оценке соответствия.

Федеральный закон [11] не регулирует отношения, связанные с разработкой, принятием, применением и исполнением санитарно-эпидемиологических требований, требований в области охраны окружающей среды, требований в области охраны труда, требований к безопасному использованию атомной энергии, в т.ч. требований безопасности объектов использования атомной энергии, требований без-

опасности деятельности в области использования атомной энергии, требований к осуществлению деятельности в области промышленной безопасности, безопасности технологических процессов на опасных производственных объектах, требований к обеспечению надежности и безопасности электроэнергетических систем и объектов электроэнергетики, требований к обеспечению безопасности космической деятельности, за исключением случаев разработки, принятия, применения и исполнения таких требований к продукции или к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

В соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании» Федеральные органы исполнительной власти вправе издавать в сфере технического регулирования акты только рекомендательного характера, за исключением оборонной продукции (работ, услуг) и технических регламентов, определённых международным договором Российской Федерации, ратифицированным в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» вправе издавать в сфере технического регулирования акты только рекомендательного характера.

Особенности технического регулирования в отношении оборонной продукции (работ, услуг), поставляемой по государственному оборонному заказу, продукции (работ, услуг), используемой в целях защиты сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа, продукции (работ, услуг), сведения о которой составляют государственную тайну, продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации, захоронения указанной продукции.

Основное содержание ФЗ «О техническом регулировании» отражено на рисунке 11.

**Закон РФ «О техническом регулировании»
(продукция и процессы ее производства, эксплуатации, хранения,
перевозки, реализации и утилизации)**

Обязательные требования	Требования, применяемые добровольно	Оценка соответствия
<p>Технические регламенты (международным договором РФ, ратифицированным в порядке, установленном законодательством РФ; ФЗ; Указ Президента; постановления Правительства)</p> <p>Цели разработки: - защита жизни, здоровья, имущества - охрана окружающей среды.</p> <p>Содержание ТР: - все виды безопасности - единство измерений.</p> <p>Координирует: ФОИВ по техническому регулированию.</p>	<p>Стандарты, классификации</p> <p><u>Виды:</u> -национальные стандарты, -международные стандарты, -региональные стандарты, -региональные своды правил, стандарты иностранных государств и своды правил иностранных государств при условии регистрации указанных стандартов и сводов правил в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.</p> <p>Национальная система стандартизации, национальный орган РФ по стандартизации, ТК, ассоциации, общества и т.д.</p>	<p><u>Формы оценки соответствия:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - государственный контроль (надзор), - аккредитация. - испытания. - регистрация, - аттестация. - позерка, - калибровка. - подтверждение соответствия. <p><u>Формы подтверждения соответствия:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - добровольная сертификация (для добровольного подтверждения соответствия) - принятие декларации о соответствии (для обязательного подтверждения соответствия), - обязательная сертификация (для обязательного подтверждения соответствия). <p>Обязательное подтверждение соответствия — > требованиям ТР.</p> <p>Добровольное подтверждение соответствия —>требования стандартов и систем сертификации.</p>

*Рисунок 11 – Основное содержание ФЗ
«О техническом регулировании»*

К важнейшим принципам технического регулирования относятся:

- независимость органов по аккредитации, органов по сертификации от изготовителей, продавцов, исполнителей и приобретателей;
- единая система и правил аккредитации;

- единство правил и методов исследований (испытаний) и измерений при проведении процедур обязательной оценки соответствия;
- единство применения требований технических регламентов независимо от видов или особенностей сделок;
- недопустимость ограничения конкуренции при осуществлении аккредитации и сертификации;
- недопустимость совмещения полномочий органа государственного контроля (надзора) и органа по сертификации;
- недопустимость совмещения одним органом полномочий на аккредитацию и сертификацию.

5.8. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений»

Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015) [12] регулирует отношения ФОИВ, юридических и физических лиц по вопросам изготовления, выпуска, эксплуатации, ремонта, продажи и импорта средств измерений и направлен на защиту граждан, юридических лиц и экономики РФ от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

Основное содержание Закона РФ «Об обеспечении единства измерений» приведено на рисунке 12.

В соответствии с Законом вся область измерений в ОПК делится на две подобласти:

- измерения в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора (ГМК и Н);
- измерения вне этих сфер.

Сферами распространения государственного метрологического контроля и надзора являются:

- здравоохранение, ветеринария, охрана окружающей среды, все виды безопасности в соответствии с ФЗ «О техническом регулировании»;
- торговые операции и взаимные расчёты между покупателем и продавцом, выпуск и применение игровых автоматов;
- деятельность с энергоресурсами;
- государственные учётные операции;

- обязательная сертификация продукции и услуг по требованиям безопасности в соответствии с ФЗ «О техническом регулировании»;
- измерения, проводимые в соответствии с судопроизводством;
- услуги почтовой связи, учёт объема оказанных услуг электро-связи операторами связи и обеспечении целостности и устойчивости функционирования сети связи общего пользования;
- официальных спортивных соревнований, обеспечение подготовки спортсменов высокого класса;
- мероприятия государственного контроля (надзора);
- деятельность в области использования атомной энергии.

Обеспечение единства измерений		
<p>В сфере ГМК и Н <u>Виды ГМК:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - утверждение типа СИ - поверка СИ - лицензирование изготовления и ремонта СИ - аттестация МВИ <p>ГМН за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выпуском, состоянием и применением СИ - применением МВИ - эталонами - соблюдением метрологических правил и норм - количеством отчуждаемых товаров - количеством фасованных товаров 	<p>Сфера ГМК и Н:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Здравоохранение, охрана окружающей среды, безопасность продукции и деятельности 2. Торговые операции взаимные расчеты 3. Все виды деятельности энергоресурсами 4. Государственные учетные операции 5. Оборона и безопасность 6. Геодезические гидрометеорологические заботы 7. Обязательная сертификация продукции и процессов 8. Производство продукции по контрактам для государственных нужд 9. Испытания и контроль качества продукции на ответственность ГОСТ 	<p>В сфере МК и Н <u>Виды МК:</u> калибровка СИ</p> <p><u>Виды МК:</u> калибровка СИ</p> <p><u>Виды МК:</u> калибровка СИ</p> <ul style="list-style-type: none"> - состоянием и применением СИ - применением МВИ - эталонами - соблюдением метрологических правил и норм. <p>Организация работ по испытаниям, поверке и калибровке СИ</p>

*Рисунок 12– Основное содержание Закона РФ
«Об обеспечении единства измерений»*

Особенности обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области обороны и безопасности государства и в

области использования атомной энергии устанавливаются Правительством Российской Федерации.

Формами государственного метрологического контроля являются:

- утверждение типа СИ;
- поверка СИ;
- лицензирование изготовления и ремонта СИ;
- аттестация МВИ.

Государственный метрологический надзор осуществляется за выпуском, состоянием и применением СИ, методиками выполнения измерений, эталонами единиц величин, соблюдением метрологических правил и норм, количеством отчуждаемых товаров, количеством фасованных товаров.

Вне сфер распространения государственного метрологического контроля и надзора единство измерений обеспечивается калибровкой СИ, сертификацией СИ, метрологическим надзором за состоянием и применением СИ, эталонами единиц величин, соблюдением метрологических правил и норм, состоянием испытательного оборудования.

Основными требованиями Закона являются:

- обязательность НТД по обеспечению единства измерений в сферах ГМК и И;
- решение об отнесении ТУ к СИ и об установлении МПИ принимает Росстандарт;
- МВИ применяемые в сферах ГМК и И, подлежат аттестации.

Порядок разработки и аттестации МВИ, а также аккредитации МСП на право их аттестации устанавливает Росстандарт:

- при выполнении работ в сферах ГМК и И создание метрологических служб или иных организационных структур по обеспечению единства измерений является обязательным;
- государственный метрологический контроль и надзор осуществляется ГМС Росстандарта;
- ГМС составляют ГНМЦ и уполномоченные организации (ФГУ ЦСМ) Росстандарта на территориях (органы ГМС);
- решение об утверждении типа СИ принимает Росстандарт;
- испытания СИ для целей утверждения типа проводят ГНМЦ и другие специализированные организации, аккредитованные Росстандартом в качестве Государственных центров испытаний;

- поверку СИ выполняют органы ГМС и ГНМЦ, а также аккредитованные установленным порядком на право поверки СИ метрологические службы юридических лиц.

Примечание: аккредитация проводится не в форме подтверждения соответствия, а в форме предоставления полномочий и поэтому по мнению Росстандарта может не соответствовать требованиям ФЭ «О техническом регулировании».

Поверка СИ выполняется специалистами, аттестованными в качестве поверителей в порядке, определённом Росстандартом.

Поверка СИ осуществляется в соответствии с межповерочными интервалами и методиками поверки, приведёнными в эксплуатационной документации на СИ, прошедшими процедуру утверждения их типа и регистрации в Госреестре.

Деятельность по изготовлению и ремонту СИ, применяемых в сферах распространения ГМК и Н, осуществляется предприятиями только при наличии лицензии, выданной Росстандартом порядком, установленным Правительством РФ.

Средства измерения, не подлежащие поверке, подвергают калибровке при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту, эксплуатации и продаже в порядке, определённом их изготовителями, владельцами или потребителями.

Калибровка СИ выполняется МСП с использованием эталонов, соподчинённых государственным эталонам единиц величин.

Добровольная сертификация СИ проводится в соответствии с законодательством РФ.

Целью разработки Государственных стандартов Российской Федерации (ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002, ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002, ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002, ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002, ГОСТ Р ИСО 5725-5-2002, ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 с изменениями в 2016г.), далее – ГОСТ Р ИСО 5725, является прямым применением в Российской Федерации шести частей основополагающего Международного стандарта ИСО 5725 под общим заголовком «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов «измерений» в практической деятельности по метрологии (разработке, аттестации и применению методик выполнения измерений), стандартизации методов контроля (испытаний, измерений, анализа), испытаниям продукции, в т.ч. для целей подтверждения соответствия, оценке компетентности испыта-

тельных лабораторий согласно требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025–2009.

ГОСТ Р ИСО 5725 представляют собой полный аутентичный текст шести частей международного стандарта ИСО 5725: в т.ч.:

ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения»;

ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений»;

ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений»;

ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений»;

ГОСТ Р ИСО 5725-5-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений»;

ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике».

Каждая часть содержит аутентичный перевод предисловия и введения к международному стандарту ИСО 5725.

Стандарты ИСО 5725 могут применяться для оценки точности выполнения измерений различных физических величин, характеризующих измеряемые свойства того или иного объекта, в соответствии со стандартизированной процедурой. При этом в пункте 1.2 ИСО 5725-1 особо отмечено, что стандарт может применяться для оценки точности выполнения измерений состава и свойств очень широкой номенклатуры материалов, включая жидкости, порошкообразные и твердые материалы – продукты материального производства или существующие в природе, при условии, что учитывают любую неоднородность материала.

Применяемый в международных стандартах термин «стандартный метод измерений» адекватен отечественному термину «стандартизованный метод измерений».

При этом следует иметь в виду, что область применения ИСО 5725 – точность стандартизованных методов измерений, в т.ч. предназначенных для целей испытаний продукции, позволяющих количественно оценить характеристики свойств (показателей качества и безопасности, объекта испытаний (продукции)). Именно поэтому во всех частях стандарта результаты измерений характеристик образцов, взятых в качестве выборки из партии изделий (или проб, отобранных из партии материала), являются основой для получения результатов испытаний всей партии (объекта испытаний). Когда объектом испытаний является конкретный образец (testspeciment, sample), результаты измерений и испытаний могут совпадать. Такой подход имеет место в примерах по определению показателей точности стандартного (стандартизованного) метода измерений, содержащихся в ИСО 5725.

Следует отметить, что в отечественной метрологии точность (ассурагу) и погрешность (error) результатов измерений, как правило, определяются сравнением результата измерений с истинным или действительным (условно истинным) значением измеряемой физической величины (являющимися фактически эталонными значениями измеряемых величин, выраженными в узаконенных единицах).

В условиях отсутствия необходимых эталонов, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу соответствующих значений единиц величин, необходимых для оценки погрешности (точности) результатов измерений, и в отечественной, и в международной практике за действительное значение зачастую принимают общее среднее значение (математическое ожидание) установленной (заданной) совокупности результатов измерений. В ИСО 5725 эта ситуация отражена в термине «принятое опорное значение» (см. пункты 3.5 и 3.6 ГОСТ Р ИСО 5725-1) и рекомендуется ГОСТ Р ИСО 5725-1 для использования в этих случаях и в отечественной практике.

В соответствии с ИСО 5725 цель государственных стандартов ГОСТ Р ИСО 5725 состоит в следующем:

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

б) регламентировать основной способ экспериментальной оценки повторяемости (сходимости) и воспроизводимости методов и результатов измерений (ГОСТ Р ИСО 5725-2);

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

г) регламентировать основные способы определения правильности методов и результатов измерений (ГОСТ Р ИСО 5725-4);

д) регламентировать для применения в определённых обстоятельствах несколько альтернатив, основным способам (ГОСТ Р ИСО 5725-2 и ГОСТ Р ИСО 5725-4) определения прецизионности и правильности методов и результатов измерений, приведённых в ГОСТ Р ИСО 5725-5;

е) изложить некоторые практические применения показателей правильности и прецизионности (ГОСТ Р ИСО 5725-6).

Алгоритмы проведения экспериментов по оценке повторяемости, воспроизводимости, промежуточных показателей прецизионности, показателей правильности (характеристик систематической погрешности) методов и результатов измерений рекомендуется внедрять через программы экспериментальных метрологических исследований показателей точности (характеристик погрешности) результатов измерений, выполняемых по разрабатываемой МВИ, и (или) через программы контроля показателей точности применяемых МВИ.

5.9. Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации»

Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» [13] устанавливает правовые основы стандартизации в Российской Федерации, в т.ч. функционирования национальной системы стандартизации, и направлен на обеспечение проведения единой государственной политики в сфере стандартизации.

Правовое регулирование отношений в сфере стандартизации осуществляется Федеральным законом «О стандартизации в Российской Федерации» совместно с другими федеральными законами и принимаемыми в соответствии с ними иными нормативными правовыми актами Российской Федерации.

Применение документов по стандартизации для целей технического регулирования устанавливается в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании».

Федеральный закон определяет стратегические цели национальной системы стандартизации, в частности – содействие интеграции России в мировую экономику и международные системы стандартизации в качестве равноправного партнера, снижение технических барьеров в торговле, установление технических требований к продукции, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособность человека, обеспечение обороноспособности, экономической, экологической, научно-технической и технологической безопасности.

Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации» также направлен на стимулирование развития отечественного производства и повышение уровня импортозамещения за счёт установления требований к объектам закупки в стране на основе национальных стандартов Российской Федерации, разработанных с учётом интересов российского бизнеса.

Федеральный закон расширил круг полномочий Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).

В соответствии со п. 6. ст. 2 Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» одними из объектов стандартизации являются исследования (испытания) и измерения (включая отбор образцов) и методы испытаний. А одной из задач стандартизации – обеспечение единства измерений и сопоставимости их результатов [13].

Кроме того, в соответствии с [13] национальные стандарты и предварительные национальные стандарты разрабатываются на основе:

- 1) результатов научных исследований (испытаний) и измерений;
- 2) положений международных стандартов, региональных стандартов, региональных сводов правил, стандартов иностранных государств, сводов правил иностранных государств, стандартов организаций и технических условий, которые содержат новые и (или) прогрессивные требования к объектам стандартизации и способствуют повышению конкурентоспособности продукции (работ, услуг);
- 3) приобретённого практического опыта применения новых видов продукции, процессов и технологий.

Федеральный закон в полном объёме вступил в силу с 1 июля 2016 года.

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Обработка результатов прямых измерений

Однократные прямые измерения являются самыми массовыми в производственных процессах. Если измерения проводят один раз, то значения измеряемой величины и погрешность измерения определяют по показанию измерительного прибора и его характеристике точности. Например, производится измерение величины X измерительным прибором с допускаемой абсолютной погрешностью $\pm\Delta_{СИ}$. В этом случае результат прямого измерения представляют в виде

$$X = X_{изм} \pm \Delta_{СИ},$$

где $X_{изм}$ – показание прибора.

Если использовался измерительный прибор утверждённого типа, с нормированными точностными характеристиками, то доверительная вероятность не указывается, но, как правило, подразумевается, что она равна $P = 0,997$. При этом предполагается, что составляющая погрешности оператора не превышает 15% от предела основной погрешности СИ.

С целью повышения точности и достоверности результатов измерений на практике применяют прямые измерения с многократными наблюдениями. Если же для определения искомой величины выполняют ряд наблюдений, то значение величины и её погрешности находят после обработки результатов наблюдений по определённому алгоритму.

При обработке результатов измерений предлагается следующий порядок операций [7].

А. Для прямых измерений

1. Результат каждого измерения записываются в таблицу.
2. Вычисляется среднее значение из n измерений

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_n .$$

3. Находятся погрешности отдельных измерений

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i.$$

4. Вычисляются квадраты погрешностей отдельных измерений (Δa_i).

5. Если одно (или два) измерение резко отличается по своему значению от остальных измерений, то следует проверить, не является ли оно промахом.

6. Определяется среднеквадратическая погрешность результата серии измерений

$$\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}.$$

7. Задается значение надежности α .

8. Определяется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(n)$ для заданной надежности α и числа произведённых измерений n (табл. 9).

9. Находятся границы доверительного интервала (погрешность результата измерений)

$$\Delta a = t_{\alpha}(n) \cdot \Delta S_{\bar{a}}.$$

10. Если величина погрешности результата измерений (определяемая в п. 9) окажется сравнимой с величиной погрешности прибора, то в качестве границы доверительного интервала следует взять величину

$$\Delta a = \sqrt{t_{\alpha}(n) \cdot \Delta S_{\bar{a}}^2 + \left(\frac{k_{\alpha}}{3}\right)^2 \delta^2}, \quad k_{\alpha} = t_{\alpha}(\infty),$$

где δ – величина погрешности прибора.

11. Окончательный результат записывается в виде

$$a = \bar{a} \pm \Delta a.$$

12. Оценивается относительная погрешность результата серии измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\bar{a}} 100\%.$$

Таблица 9 – Коэффициенты Стьюдента t_{α}

α n-1	0.90	0.95	0.98	0.99	0.999
1	6.31	12.7	31.8	63.7	636.6
2	2.92	4.30	6.96	9.92	31.6
3	2.35	3.18	4.54	5.84	12.9
4	2.13	2.78	3.75	4.60	8.61
5	2.02	2.57	3.36	4.03	6.87
6	1.94	2.45	3.14	3.71	5.96
7	1.89	2.36	3.00	3.50	5.41
8	1.86	2.31	2.90	3.36	5.04
9	1.83	2.26	2.82	3.25	4.78
10	1.81	2.23	2.76	3.17	4.59
11	1.80	2.20	2.72	3.11	4.44
12	1.78	2.18	2.68	3.05	4.32
13	1.77	2.16	2.65	3.01	4.22
14	1.76	2.14	2.62	2.98	4.14
15	1.75	2.13	2.60	2.95	4.07
16	1.75	2.12	2.58	2.92	4.02
17	1.74	2.11	2.57	2.90	3.97
18	1.73	2.10	2.55	2.88	3.92
19	1.73	2.09	2.54	2.86	3.88
20	1.72	2.09	2.53	2.85	3.85
21	1.72	2.08	2.52	2.83	3.82
22	1.72	2.07	2.51	2.82	3.79
23	1.71	2.07	2.50	2.81	3.77
24	1.71	2.06	2.49	2.80	3.75
25	1.71	2.06	2.49	2.79	3.73
26	1.71	2.06	2.48	2.78	3.71
27	1.70	2.05	2.47	2.77	3.69
28	1.70	2.05	2.47	2.76	3.67
29	1.70	2.05	2.46	2.76	3.66
30	1.70	2.04	2.46	2.75	3.65
32	1.69	2.04	2.45	2.74	3.62
34	1.69	2.03	2.44	2.73	3.60
36	1.69	2.03	2.43	2.72	3.58
38	1.69	2.02	2.43	2.71	3.57
40	1.68	2.02	2.42	2.70	3.55
42	1.68	2.02	2.42	2.70	3.54
44	1.68	2.02	2.41	2.69	3.53
46	1.68	2.01	2.41	2.69	3.52
48	1.68	2.01	2.41	2.68	3.51
50	1.68	2.01	2.40	2.68	3.50
55	1.67	2.00	2.40	2.67	3.48
60	1.67	2.00	2.39	2.66	3.46
65	1.67	2.00	2.39	2.65	3.45

Доверительные границы погрешности результата измерений определяют в зависимости от соотношения систематической и случайной составляющей погрешности.

Границы систематической погрешности Θ результата измерения вычисляют путём построения композиции не исключённых систематических погрешностей СИ, метода и другими источниками погрешности. При равномерном распределении систематических погрешностей эти границы вычисляются по формуле

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^m \delta_i, \text{ при } m \leq 3, \quad (6.1)$$

или

$$\Theta = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_i^2}, \text{ при } m \geq 4, \quad (6.2)$$

где δ_i – граница i -ой составляющей систематической погрешности; k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью. Коэффициент k принимают равным 1,1 при доверительной вероятности $P = 0,95$. При $P = 0,99$ значение $k = 1,4$.

В случае если $\frac{\Theta}{\Delta S_{\bar{a}}} < 0,8$, то систематическими погрешностями по сравнению со случайными пренебрегают и принимают, что граница погрешности результата измерения $\Delta = t_{\alpha}(n) \cdot \Delta S_{\bar{a}}$. Если $\frac{\Theta}{\Delta S_{\bar{a}}} > 8$, то случайной погрешностью по сравнению с систематическими пренебрегают и принимают, что граница погрешности результата $\Delta = \Theta$.

Наиболее часто в этом случае принимают Δ равной δ – предельно допустимой основной погрешности применяемого СИ, т.е. $\Delta = \pm \delta$ или $\Delta = \pm \Delta_{\text{СИ}}$.

В случае если приведённые выше неравенства не выполняются, границу результатов измерения вычисляют по формуле

$$\Delta = k_{\Sigma} \cdot \Delta a_{\Sigma}, \quad (6.3)$$

где k_{Σ} – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и систематической погрешностей; Δa_{Σ} – оценка суммарного среднего квадратического результата измерения.

Оценку Δa_{Σ} вычисляют по формуле

$$\Delta a_{\Sigma} = \sqrt{\Delta S_{\bar{a}}^2 + \sum_{i=1}^m \frac{(\delta_i)^2}{3}}. \quad (6.4)$$

Коэффициент k_{Σ} вычисляют по эмпирической формуле

$$k_{\Sigma} = \frac{t_{\alpha}(\Delta S_{\bar{a}}) + \Theta}{\Delta S_{\bar{a}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\delta_i^2}{3}}}, \quad (6.5)$$

6.2. Обработка результатов косвенных измерений

Косвенным считается измерение, при котором искомая величина находится с помощью известной функциональной зависимости $Z = f(a, b, c, \dots)$ от других физических величин a, b, c, \dots , подвергаемых прямым измерениям.

Обработку результатов косвенного измерения проводят следующим образом.

Б. Для косвенных измерений

1. Для каждой серии измерений величин, входящих в определение искомой величины, проводится обработка, как описано в пункте А. При этом для всех измеряемых величин задают одно и то же значение надежности α .

2. Находится выражение для абсолютной и относительной погрешностей искомой величины в соответствии с конкретным видом функциональной зависимости (табл. 10, 11).

3. Оцениваются границы доверительного интервала для результата косвенных измерений:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \Delta b^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 \Delta c^2 + \dots},$$

где производные $\frac{\partial f}{\partial a}, \frac{\partial f}{\partial b}, \frac{\partial f}{\partial c}, \dots$ вычисляются при $a = \bar{a}, b = \bar{b}, c = \bar{c}, \dots$

4. Окончательный результат записывается в виде:

$$f(a, b, c, \dots) = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots) \pm \Delta f.$$

5. Определяется относительная погрешность результата серии косвенных измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta f}{f} 100\%.$$

Таблица 10 – Приближенное определение погрешностей функции z одного переменного

№ п/п	Вид функции $z=z(a)$	Абсолютная погрешность ΔZ	Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta Z}{Z}$
1.	$ca, c = \text{const}$	$c\Delta a$	$\frac{\Delta a}{\bar{a}}$
2.	$a^n, n \geq 0$	$n \bar{a}^{(n-1)} \Delta a$	$n \frac{\Delta a}{\bar{a}}$
3.	$\frac{a}{1+a}$	$\frac{(1+\bar{a}-\bar{a})}{(1+\bar{a})^2} \Delta a = \frac{\Delta a}{(1+\bar{a})^2}$	$\frac{\Delta a}{\bar{a}(1+\bar{a})}$
4.	$\frac{a}{1-a}$	$\frac{(1-\bar{a}+\bar{a})}{(1-\bar{a})^2} \Delta a = \frac{\Delta a}{(1-\bar{a})^2}$	$\frac{\Delta a}{\bar{a}(1-\bar{a})}$
5.	$\sqrt[n]{a}$	$\frac{1}{n} \bar{a}^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \Delta a = \frac{1}{n} \frac{\sqrt[n]{\bar{a}}}{\bar{a}} \Delta a$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta a}{\bar{a}}$
6.	$e^{\frac{a}{c}}, c = \text{const}$	$e^{\frac{\bar{a}}{c}} \frac{\Delta a}{c}$	$\frac{\Delta a}{c}$
7.	$A^{\frac{a}{c}}, c = \text{const}$ $A = \text{const}$	$A^{\frac{\bar{a}}{c}} \ln A \frac{\Delta a}{c}$	$\ln A \frac{\Delta a}{c}$
8.	$\ln a$	$\frac{\Delta a}{\bar{a}}$	$\frac{\Delta a}{\ln \bar{a} \cdot \bar{a}}$
9.	$\sin\left(\frac{a}{c}\right), c = \text{const}$	$\cos\left(\frac{\bar{a}}{c}\right) \frac{\Delta a}{c}$	$\text{ctg}\left(\frac{\bar{a}}{c}\right) \frac{\Delta a}{c}$
10.	$\cos\left(\frac{a}{c}\right), c = \text{const}$	$\sin\left(\frac{\bar{a}}{c}\right) \frac{\Delta a}{c}$	$\text{tg}\left(\frac{\bar{a}}{c}\right) \frac{\Delta a}{c}$
11.	$\text{tg}\left(\frac{a}{c}\right), c = \text{const}$	$\frac{1}{\cos^2\left(\frac{\bar{a}}{c}\right)} \frac{\Delta a}{c}$	$\frac{2}{\cos\left(\frac{2\bar{a}}{c}\right)} \frac{\Delta a}{c}$
12.	$\text{ctg}\left(\frac{a}{c}\right), c = \text{const}$	$\frac{1}{\sin^2\left(\frac{\bar{a}}{c}\right)} \frac{\Delta a}{c}$	$\frac{2}{\sin\left(\frac{2\bar{a}}{c}\right)} \frac{\Delta a}{c}$

*) Для достаточно больших значений $|c|$ ($\bar{a} \ll |c|$).

Таблица 11 – Приближенное определение погрешностей функции z нескольких переменных

№ п/п	Вид функции $z=z(a, b, c, \dots)$	Абсолютная погрешность ΔZ	Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta Z}{Z}$
1.	$Aa+Bb$ ($A=\text{const}, B=\text{const}$)	$\sqrt{A^2 \Delta a^2 + B^2 \Delta b^2}$	$\frac{\sqrt{A^2 \Delta a^2 + B^2 \Delta b^2}}{Aa + Bb}$
2.	$Aa-Bb$ ($A=\text{const}, B=\text{const}$)	$\sqrt{A^2 \Delta a^2 + B^2 \Delta b^2}$	$\frac{\sqrt{A^2 \Delta a^2 + B^2 \Delta b^2}}{Aa - Bb}$
3.	$Pa+Rb+Qc$ ($P=\text{const}, R=\text{const}, Q=\text{const}$)	$\sqrt{P^2 \Delta a^2 + R^2 \Delta b^2 + Q^2 \Delta c^2}$	$\frac{\sqrt{P^2 \Delta a^2 + R^2 \Delta b^2 + Q^2 \Delta c^2}}{Pa + Rb + Qc}$
4.	ab	$\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}$	$\frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}}{a \cdot b} = \sqrt{\frac{\Delta a^2}{a^2} + \frac{\Delta b^2}{b^2}}$
5.	abc	$\sqrt{b^2 c^2 \Delta a^2 + c^2 a^2 \Delta b^2 + a^2 b^2 \Delta c^2}$	$\sqrt{\frac{\Delta a^2}{a^2} + \frac{\Delta b^2}{b^2} + \frac{\Delta c^2}{c^2}}$
6.	$\frac{a}{b}$	$\frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}}{b^2} = \sqrt{\frac{\Delta a^2}{b^2} + \frac{a^2 \Delta b^2}{b^4}}$	$\sqrt{\frac{\Delta a^2}{a^2} + \frac{\Delta b^2}{b^2}}$
7.	$a^\alpha b^\beta c^\gamma$ ($\alpha=\text{const}, \beta=\text{const}, \gamma=\text{const}$)	$\left(\alpha^2 b^{2\beta} c^{2\gamma} a^{2(\alpha-1)} \Delta a^2 + \beta^2 c^{2\gamma} a^{2\alpha} b^{2(\beta-1)} \Delta b^2 + \gamma^2 a^{2\alpha} b^{2\beta} c^{2(\gamma-1)} \Delta c^2 \right)^{1/2}$	$\sqrt{\alpha^2 \frac{\Delta a^2}{a^2} + \beta^2 \frac{\Delta b^2}{b^2} + \gamma^2 \frac{\Delta c^2}{c^2}}$
8.	$\frac{a}{a+b}$	$\frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}}{\sqrt{\frac{b^2}{(a+b)^4} + \frac{a^2}{(a+b)^4}}} = \frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}}{(a+b)^2}$	$\frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}}{a(a+b)}$
9.	$\frac{a}{a-b}$	$\frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}}{(a-b)^2}$	$\frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}}{a(a-b)}$
10.	$\frac{a^2}{b} + b$	$\sqrt{\frac{4a^2 \Delta a^2}{b^2} + \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2 \Delta b^2}$	$\frac{\sqrt{4a^2 b^2 \Delta a^2 + (b^2 - a^2)^2 \Delta b^2}}{b(a^2 + b^2)}$
11.	$ab+c$	$\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2 + \Delta c^2}$	$\frac{\sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2 + \Delta c^2}}{ab + c}$
12.	$a(b+c)$	$\sqrt{(b+c)^2 \Delta a^2 + a^2 (\Delta b^2 + \Delta c^2)}$	$\frac{\sqrt{(b+c)^2 \Delta a^2 + a^2 (\Delta b^2 + \Delta c^2)}}{a(b+c)}$

При отсутствии корреляционной связи между аргументами доверительные границы погрешности линейного косвенного измерения вычисляются по формуле

$$\Delta f(p) = k \cdot \Delta f,$$

где k – поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью P и числом измеряемых параметров прямым методом.

6.3. Обнаружение грубых погрешностей измерений

Грубыми называются погрешности, явно превышающие по своему значению погрешности, оправданные условиями проведения эксперимента.

Причинами появления грубых погрешностей (промахов) могут быть:

- неопытность или утомляемость оператора, вследствие чего могут возникнуть ошибки в отчётах и записи результатов наблюдений;
- резкое изменение условий измерительного эксперимента: «броски» тока источника питания;
- появление магнитных и электрических полей, о чём не было известно оператору;
- незаметные механические воздействия: сотрясение измерительных приборов с кратковременным нарушением их регулировки;
- сбои в работе цифровых измерительных устройств и т.п.

Экспериментатор иногда в процессе измерений сразу же убеждается в том, что данное измерение является промахом и не заносит его результат в таблицу. Однако могут возникнуть случаи, когда результат измерения лишь вызывает сомнения в его правильности. В таких случаях, как правило, проводят дополнительные измерения, позволяющие убедиться в наличии или отсутствии промаха. Особую актуальность проблема обнаружения и устранения грубых погрешностей приобретает при автоматизации процесса измерений и обработке их результатов. В этой связи алгоритм обработки наблюдений должен предусматривать автоматическое исключение грубых погрешностей. Поскольку грубые погрешности относятся к случайным погрешно-

стям, то для их обнаружения и исключения применяют методы теории вероятностей (методы статистической проверки гипотез).

Проверяемая гипотеза состоит в утверждении, что результат наблюдений X_i не является промахом, т.е. принадлежит генеральной совокупности значений случайной величины X с законом распределения $f(X)$, с известными параметрами.

Теории погрешностей наиболее часто пользуются статистическими критериями Райта и Романовского [4].

Критерий Райта (критерий четырех сигм). Если случайные отклонения результата наблюдения превышают 4σ , то данное наблюдение – промах. Этот критерий основывается на том, что вероятность появления погрешности $\Delta > 4\sigma$ при нормальном распределении равна 0,00064, т.е. является маловероятной и не характерной для данного ряда наблюдений. При исследовании процессов с более известной закономерностью к промахам иногда относят погрешности, превышающие $\Delta 3\sigma$ – критерий трех сигм.

Следует отметить, что критерий Райта достоверен при относительно большом ($n > 30$) числе наблюдений n . При малом числе измерений более достоверные результаты даёт критерий Романовского.

Критерий Романовского. Для оценки по этому критерию используют рассчитанные заранее условные значения максимальной погрешности Δ_m с разной доверительной вероятностью P , т.е. наибольшее значение Δ , которое может принимать погрешность по чисто случайным причинам. Погрешности со значением $\Delta > \Delta_m$ относят к грубым. Для использования этого критерия применяется специальная относительная величина $t = \frac{\Delta_m}{\sigma}$, где σ – среднее квадратическое отклонение распределения случайных величин Δ . Для нормального закона распределения погрешностей значения t протабулированы для различных значений доверительной вероятности P и числа измерений.

Результаты расчетов сведены в таблицу 12, в которой приведены относительные значения $t = \frac{\Delta_m}{\sigma}$ допустимых случайных погрешностей Δ_m для различных доверительных вероятностей P и чисел измерений n .

Таблица 12 – Результаты расчетов

n	t при P равном			
	0.95	0.98	0.99	0.995
2	15.56	38.97	77.96	779.7
3	4.97	8.04	11.46	36.5
4	3.56	5.08	6.53	14.46
5	3.04	4.10	5.04	9.43
6	2.78	3.64	4.36	7.41
7	2.62	3.36	3.96	6.37
8	2.51	3.18	3.71	5.73
9	2.43	3.05	3.54	5.31
10	2.37	2.96	3.41	5.01
11	2.33	2.89	3.31	4.79
12	2.29	2.83	3.23	4.62
13	2.26	2.78	3.17	4.48
14	2.24	2.74	3.12	4.37
15	2.22	2.71	3.08	4.28
16	2.20	2.68	3.04	4.20
17	2.18	2.66	3.01	4.13
18	2.17	2.64	3.00	4.07
19	2.16	2.62	2.95	4.02
20	2.145	2.60	2.93	3.98
21	2.14	2.59	2.91	3.95
□	1.96	2.53	2.58	3.29

Промахи как результаты наблюдений с грубыми погрешностями из рассмотрения исключают.

6.4. Обработка результатов неравноточных рядов (групп) измерений

Ранее был рассмотрен способ обработки прямых равноточных измерений, основанный на том, что результаты наблюдений рассматривали как случайные, распределённые по одному и тому же закону.

Однако в метрологической практике часто встречаются ситуации, когда необходимо найти наиболее достоверное значение величины и оценить её возможные отклонения от действительного значения на основании измерений, проводимых разными операторами с

применением разных приборов в разных лабораториях. Это характерно для оценки воспроизводимости измерений.

Полученные при этом результаты измерений называются неравноточными при условии, что оценка их дисперсий значимо отличаются друг от друга, а средние арифметические являются оценками одного и того же значения измеряемой величины.

Пусть при измерении одной и той же величины A имеется L групп (рядов) наблюдений. По наблюдениям каждой группы получены средние арифметические значения $\overline{X}_1, \dots, \overline{X}_L$.

Определены оценки дисперсий измерений каждой группы $\sigma^2(\overline{X}_1), \dots, \sigma^2(\overline{X}_L)$ и число измерений в каждой группе n_1, \dots, n_L .

В общем случае требуется найти оценку измеряемой величины по данным всех групп наблюдений. Наиболее достоверное значение X_0 , которое можно приписать измеряемой величине на основании имеющихся данных, должно представлять собой некоторую функцию исходных средних арифметических с учётом весов, характеризующих степень доверия к результатам измерений каждой группы [7].

Обычно оценку измеряемой величины X_0 представляют как линейную функцию от \overline{X}_i , т.е. как их среднее взвешенное:

$$X_0 = \sum_{i=1}^L a_i \overline{X}_i, \quad (6.6)$$

где a_i – удельные веса исходных средних арифметических.

Величина X_0 , определённая в соответствии с выражением (6.6), называется средним взвешенным.

Задача оценки неравноточных рядов измерений сводится к нахождению весов a_i . Одним из условий оценки с помощью удельных весов является выполнение равенства

$$\sum_{i=1}^L a_i = 1. \quad (6.7)$$

Для того чтобы оценка X_0 была эффективной, необходимо так выбрать удельные веса, чтобы они обращали в минимум дисперсию среднего взвешенного $D(X_0)$. Этому условию удовлетворяет требование:

$$a_1\sigma^2(\overline{X}_1) = a_2\sigma^2(\overline{X}_2) = \dots = a_L\sigma^2(\overline{X}_L).$$

С учётом этого, если обозначить $\rho_i = \frac{1}{\sigma^2(\overline{X}_i)}$, то получим иско-
мое значение удельного веса i -го ряда измерений

$$a_i = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^L \rho_i}. \quad (6.8)$$

Поскольку удельные веса неслучайные величины, то нетрудно
определить дисперсию для X_0 , пользуясь формулой

$$D[X_0] = D\left[\sum_{i=1}^L a_i \overline{X}_i\right] = \frac{\sum_{i=1}^L \left[\frac{1}{\sigma^2(\overline{X}_i)}\right]^2 \sigma^2(\overline{X}_i)}{\left[\sum_{i=1}^L \frac{1}{\sigma^2(\overline{X}_i)}\right]^2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^L \frac{1}{\sigma^2(\overline{X}_i)}}. \quad (6.9)$$

Приведённые выражения позволяют осуществлять обработку
неравноточных измерений.

Рассмотрим пример. В трех лабораториях с применением раз-
личных прямых методов измерения получены следующие результаты
измерения электрического сопротивления постоянному току одного и
того же резистора (со средними квадратическими отклонениями ре-
зультатов измерений):

$$R = (1001 \pm 2) \text{ Ом}; R = (1002 \pm 3) \text{ Ом};$$

$$R = (999 \pm 1) \text{ Ом}.$$

Удельные веса отдельных результатов вычислим по формулам

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2^2} : \left[\frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{1^2} \right] = 0,1837 \\ a_2 &= \frac{1}{3^2} : \left[\frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{1^2} \right] = 0,0817 \\ a_3 &= \frac{1}{1^2} : \left[\frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{1^2} \right] = 0,7346 \end{aligned} \quad (6.10)$$

Видно, что выполняется условие $a_1 + a_2 + a_3 = 1$.

Уравнения в системе совокупных измерений могут отличаться друг от друга видом и сочетанием величин, входящих в каждое уравнение.

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

Совместные измерения можно в общем случае выразить системой уравнений, аналогичной системе уравнений (6.11), с той лишь разницей, что уравнения в системе совместных измерений имеют одинаковый вид и получаются при измерении одних и тех же не одноименных величин в разных условиях.

Определение погрешностей совокупных и совместных измерений представляет сложную задачу. Результаты таких измерений, как правило, обрабатывают методом наименьших квадратов, с помощью которого удаётся получить значения искомых величин, наиболее близкие к истинным.

Обработка результатов совокупных и совместных измерений методом наименьших квадратов заключается в следующем.

После подстановки результатов измерений $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ в систему уравнений совокупных и совместных измерений (6.11) получается система так называемых условных уравнений, содержащих только n неизвестных искомых величин $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$, и числовые значения $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, соответствующие результатам измерения в каждом уравнении:

$$\left. \begin{aligned} F_1(Y_1 Y_2 Y_3, \dots, Y_n) &= a_1; \\ F_2(Y_1 Y_2 Y_3, \dots, Y_n) &= a_2; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots; \\ F_n(Y_1 Y_2 Y_3, \dots, Y_n) &= a_n; \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

где F_i – символ функциональной зависимости между величинами в i -ом опыте.

Условность этих уравнений заключается в том, что из-за погрешностей измерения $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ решение уравнений вида (6.12) дадут значения $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$, отличные от априорных (теоретических).

Действительно, вследствие ограниченной точности определения величин X_i условные уравнения одновременно не обращаются в тождества.

Поэтому задача обработки результатов совокупных измерений заключается в том, чтобы найти значения оценок искомых величин $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$, наилучшим образом удовлетворяющие всем полученным условным уравнениям.

Если значения этих оценок Z_i подставить в условные уравнения, то их правые части будут отличаться от левых. Для получения тождества нужно записать новую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} F_1(Z_1 Z_2 Z_3, \dots, Z_n) + v_1 &= a_1; \\ F_2(Z_1 Z_2 Z_3, \dots, Z_n) + v_2 &= a_2; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots; \\ F_n(Z_1 Z_2 Z_3, \dots, Z_n) + v_n &= a_n; \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

которая отличается от системы условных уравнений (6.13) на некоторые величины v_1, v_2 и v_n , которые называют остаточными погрешностями условных уравнений.

Метод наименьших квадратов предполагает, что сумма квадратов остаточных погрешностей совокупных и совместных измерений должна быть минимальна:

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \min. \quad (6.14)$$

Таким образом, наиболее достоверной системой значений неизвестных, входящих в совокупность условных уравнений, является та система, для которой сумма квадратов остаточных погрешностей принимает наименьшее значение.

Сумма квадратов остаточных погрешностей, определяемых в соответствии с системой условных уравнений (6.13), составляет:

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n F_i^2(Z_1, \dots, Z_n).$$

Р е ш е н и е:

1. Обозначим искомые значения емкости конденсаторов $C1$ и $C2$ через Z_1 и Z_2 соответственно.

2. Подставим систему безусловных уравнений (6.13):

$$Z_1 + v_1 = 0,2071;$$

$$Z_2 + v_2 = 0,2056;$$

$$Z_1 + Z_2 + v_{12} = 0,04111,$$

где v_1, v_2 и v_{12} остаточные погрешности условных уравнений.

3. Найдём остаточные погрешности:

$$v_1 = 0,2071 - Z_1, \quad v_2 = 0,2056 - Z_2, \quad v_{12} = 0,4111 - Z_1 - Z_2.$$

4. Составим систему нормальных уравнений:

$$v_1 \frac{\partial v_1}{\partial Z_1} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial Z_1} + v_{12} \frac{\partial v_{12}}{\partial Z_1} = 0;$$

$$v_1 \frac{\partial v_1}{\partial Z_2} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial Z_2} + v_{12} \frac{\partial v_{12}}{\partial Z_2} = 0,$$

которая после подстановки значений остаточных погрешностей и их частных производных будет иметь вид:

$$(-1)(0,2071 - Z_1) + 0(0,2056 - Z_2) + (-1)(0,4111 - Z_1 - Z_2) = 0;$$

$$0(0,2071 - Z_1) + (-1)(0,2056 - Z_2) + (-1)(0,4111 - Z_1 - Z_2) = 0$$

или

$$2Z_1 + Z_2 = 0,6182;$$

$$Z_1 + 2Z_2 = 0,6167,$$

откуда

$$Z_1 = 0,2066 \text{ мкФ} \text{ и } Z_2 = 0,2051 \text{ мкФ}.$$

Эти значения являются наиболее близкими к истинным значениям емкостей $C1$ и $C2$.

7. РАЗРАБОТКА И АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Требования к методикам выполнения измерений

Измерения составляют очень важную часть человеческой деятельности, т.к. они являются единственным источником получения количественной информации об окружающей нас материальной природе. Эта информация получается путём последовательности операций по применению специального технического средства (средство измерений), хранящего единицу физической величины, заключающихся в сравнении измеряемой величины с её единицей с целью получения значения этой величины.

Технология измерений в зависимости от целей включает выбор принципа, метода и методики измерений. Принцип измерений составляет положенное в основу то или иное физическое явление или эффект. Метод измерений, как правило, обусловлен устройством средства измерений и представляет некоторую совокупность приёмов сравнения измеряемой величины с её единицей в соответствии с принятым принципом измерений. Методически технология измерений обуславливается методикой выполнения измерений.

Методика (метод) измерений (согласно ГОСТ Р 8.563-2009) – это совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Методика выполнения измерений (согласно ГОСТ Р 8.010-2013) – установленная логическая последовательность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений в соответствии с принятым методом измерений. Важной особенностью принятого определения является то, что под МВИ понимается технологический процесс измерения. При этом не следует смешивать МВИ с документом, в котором регламентируется данная методика.

Другой важнейшей особенностью МВИ является получение результатов измерений с известной погрешностью. Эту погрешность измерений обычно называют приписанной или гарантированной погрешностью. Выполнение этого условия играет решающую роль в обеспечении единства измерений. Оно составляет «метрологиче-

скую» сущность работ в области МВИ и подтверждается в результате метрологической экспертизы МВИ.

Метрологическая экспертиза МВИ – это анализ и оценка выбора методов и средств измерений, операций и правил проведения измерений и обработки из результатов с целью установления соответствия МВИ предъявленным метрологическим требованиям.

Обычно в зависимости от сложности и области применения МВИ излагают в отдельном документе (стандарте, инструкции, методическом указании и т.п.), а также в разделе или части документа (разделе технического описания, технических условий или технологического документа и т.п.).

Следует отметить, что не все МВИ описываются или регламентируются документом на МВИ. Вполне очевидно, что при прямых измерениях, когда искомое значение физической величины получают непосредственно по показаниям средства измерений, документирование методики не производится. В этих случаях МВИ реализуется конструкцией измерительного прибора, его алгоритмом и программой работы.

Особо важную роль играют МВИ при аттестации ИО, в частности при разработке методики аттестации. Как правило, методика аттестации ИО базируется на комплексе отдельных МВИ контролируемых параметров ИО. При этом в МА могут применяться стандартизированные (внесённые в реестр аттестованных) МВИ. Следует подчеркнуть, что МВИ может быть составной частью методики поверки средств измерений или методики аттестации ИО, но не наоборот.

Основной нормативной и методической базой работ в области МВИ являются положения Закона РФ «Об обеспечении единства измерений» и требования ГОСТ Р.8.563-2009 «ГСИ, Методики (методы) измерений», ГОСТ Р 8.010-2013 «Методики выполнения измерений. Основные положения», ГОСТ Р8.568-97 «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования».

Так, ФЗ № 102 (ред. от 13.07.2015) «Об обеспечении единства измерений» гласит, что измерения должны осуществляться в соответствии с аттестованными в установленном порядке методиками. Порядок разработки и аттестации методик выполнения измерений определяется Росстандартом. Выполнение этих «жестких» требований направлено на обеспечение единства измерений в сфере распространения

государственного контроля и надзора, а также для контроля состояния сложных технических систем.

Сфера государственного метрологического контроля и надзора охватывает обширное поле деятельности и распространяется на следующие области деятельности:

- здравоохранение, обеспечение безопасности труда, охрану окружающей среды, ветеринарию;
- обеспечение обороны государства;
- государственные учётные операции;
- геодезические и гидрометеорологические работы;
- торговые операции и взаимные расчёты между покупателем и продавцом, в т.ч. на операции с применением игровых автоматов и устройств;
- банковские, налоговые, таможенные и почтовые операции;
- производство продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд в соответствии с законодательством Российской Федерации;
- испытания и контроль качества продукции в целях определения соответствия обязательным требованиям государственных стандартов Российской Федерации;
- обязательную сертификацию продукции и услуг;
- измерения, проводимые по поручению органов суда, прокуратуры, арбитражного суда, государственных органов управления Российской Федерации;
- регистрацию национальных и международных спортивных рекордов.

С учётом особенностей сферы обороны и безопасности документы на МВИ, разрабатываемые для применения в Вооружённых Силах Российской Федерации и других войсках, подлежат метрологической экспертизе в Главном метрологическом центре Минобороны России.

Важной особенностью этапа разработки и применения МВИ в сфере распространения государственного метрологического контроля является то, что типы выбранных средств измерений (в т.ч. импортных) должны быть утверждены Росстандартом.

7.2. Построение и изложение документов на МВИ

Наименование документа на МВИ должно быть кратким, точно характеризовать объект измерений и обеспечивать правильную классификацию МВИ для включения в информационные указатели (реестр) аттестованных методик.

В документах, регламентирующих МВИ, в общем случае во введении указывают назначение МВИ, отражающее область её применения, специфику измеряемой величины. В регламентирующем документе изложение МВИ рекомендуется приводить в виде следующих разделов:

- требования к погрешности измерений, в которых приводятся числовые значения требуемых или приписанных характеристик погрешности;
- средства измерений и вспомогательные устройства, в котором указывается перечень средств измерений и других технических средств, применяемых при выполнении измерений, с указанием из метрологических характеристик;
- метод (методы) измерений, в котором излагается описание приёмов, сравнения измеряемой величины с единицей в соответствии с принципом, положенным в основу предложенного метода;
- условия измерений, в котором указываются температура, влажность, давление окружающего воздуха и перечень других влияющих величин с границами их допустимых значений;
- подготовка к выполнению и выполнение измерений, где указываются подготовительные работы и содержится перечень и объём, последовательность операций выполнения измерений;
- требования, выполнение которых обеспечивает безопасность труда, норм санитарии и охрану окружающей среды;
- требования к квалификации операторов, где содержатся сведения об уровне квалификации (профессии, образования, специальной подготовке и др.) лиц, допускаемых к выполнению измерений по данной МВИ;
- обработка (вычисление) результатов измерений, в котором приводятся способы обработки и получения результатов измерений;
- оформление результатов измерений, в котором указываются форма представления, вид носителя получаемой измерительной информации и др. требования, документ или записи результатов изме-

рений удостоверяет лицо, проводившее измерения, а при необходимости – руководитель организации (предприятия).

Допускается исключать или объединять указанные разделы или изменять их наименования, либо включать дополнительные разделы с учётом особенностей измерений.

Утверждение документа на МВИ производится в порядке, установленном в ведомстве (на предприятии или в организации). Порядок утверждения МВИ, как правило, излагают в Положении о метрологической службе предприятия (организации).

В документах на МВИ, в которых предусмотрено использование конкретных экземпляров средств измерений, например, изготовленных в единичных экземплярах или приобретённых по импорту, и других технических средств, необходимо указывать заводские (инвентарные и т.п.) номера этой измерительной техники.

Типовая структура и содержание документа на МВИ представлены в таблице 13

Таблица 13– Структура и содержание документа на МВИ

Наименование раздела МИ	Требования ГОСТ Р 563-2009 к содержанию раздела	Примечание
Назначение МВИ	Область применения	Объект измерений, наименование продукции, область использования (отрасль, сеть отраслей, лаборатории и т.д.)
	Наименование измеряемой величины	Если сложное название, то дать полное развернутое определение
	Характеристики измеряемой величины	Диапазон и частотный спектр, значения неинформативных параметров и т.п.
	Характеристики объекта измерений (если они влияют на погрешность)	Выходное сопротивление, жесткость в месте контакта с датчиком, состав пробы, температура и т.п.
Условия измерения	Номинальные значения и (или) диапазоны влияющих величин, ограничения на продолжительность, число параллельных определений, требования к объекту	Если средства измерений размещены в разные места измерительной схемы, то указать условия измерений для каждого места отдельно

Метод (методы) измерений	В соответствии с действующими документами по выбору методов для измерений данного типа или в соответствии с требованиями МИ 1967-89	
Средства измерений, вспомогательные устройства, материалы и растворы	Полное и точное наименование СИ с указанием их характеристик или ссылка на документы, где эти требования приведены (ТУ, ГОСТ, сертификаты и т.п.)	
Порядок подготовки к измерениям	Перечень и последовательность выполнения операций, необходимых для подготовки СИ, вспомогательных устройств, материалов и смесей к измерениям	Сборка схемы измерений, установка нуля, выдержка во включенном состоянии, тестирование, прогрев и т.п.
Порядок выполнения измерений	Перечень, объем и последовательность выполнения операций в ходе непосредственного проведения измерений	Описание операций, периодичность и число измерений, требования к представлению промежуточных результатов (число значащих цифр после запятой и др.)
Обработка результатов измерений	Перечень и последовательность выполнения операций и вычислений для получения конечных результатов измерений	Если необходимо, приводят константы, коэффициенты, таблицы, графики, уравнения и т.д.
Контроль погрешности измерений	Нормативы, процедура и периодичность контроля	Для контроля погрешности результатов КХА используют МИ 2335-2003.
Требования к погрешности измерений	Суммарная погрешность измерений в документе на МИ должна быть представлена в виде конкретного численного значения (в единицах измеряемой величины) или в относительном виде (в %)	

7.3. Разработка методик выполнения измерений

Методики измерений разрабатывают с целью обеспечения выполнения измерений с погрешностью, не превышающей требуемой или приписанной характеристики. Осуществляют МВИ, как правило, специалисты, обладающие высокой метрологической подготовкой и технической компетентностью в данной области измерений. С учётом того, что обязательным этапом разработки является экспертиза материалов исследований и разработки МВИ, эти специалисты должны

быть аттестованы в качестве экспертов-метрологов в порядке, установленном Росстандартом.

Сотрудники, непосредственно участвующие в разработке МВИ и экспертизе документов, должны знать формы представления результатов измерений, характеристики погрешности измерений и формы их представлений для всех возможных случаев применения, а также способы использования характеристик погрешностей измерений для определения характеристик погрешностей испытаний и достоверности контроля параметров продукции, выполняемых с помощью измерений.

Разработку МВИ осуществляют на основании исходных данных, в которых указывают области применения (объект измерений), требования к погрешности измерений, условия измерений и другие требования. Исходные данные излагают в ТЗ, технических условиях, отчётах о научно-исследовательской работе, договорах на оказание научно-технической услуги и других документах.

Регламентацию МВИ в отдельном документе по установившейся практике определяет заказчик (потребитель) на разработку продукции (изделия), о чём указывается в ТЗ на разработку МВИ или в разных ТЗ в целом на продукцию.

Часто в качестве исходных данных на разработку МВИ используется допуск на контролируемый параметр. Обычно считается удовлетворительным соотношение между пределом допускаемой погрешности измерений и границей поля допуска на параметр $1 : 3$.

Наиболее распространённым способом выражения требований к точности измерений являются допускаемый интервал, в котором с заданной вероятностью находится результат измерений по заданной в МВИ.

Измерения в общем случае следует рассматривать как познавательный процесс, в результате которого можно получить описание исследуемого объекта, т.е. получить модель объекта измерений. Особенностью разработки МВИ, как регламентирующего документа, является то, что важнейшая цель выполнения измерений по данной методике – это обеспечение сходимости (воспроизводимости) результатов измерений в данных условиях с известной погрешностью. В известном смысле, разработчик МВИ решает творческую задачу идентификации, т.е. задачу определения значений параметров модели объекта измерений с требуемой точностью.

Анализ процесса разработки разнообразных по своим физическим принципам МВИ показал, что разработчик, как правило, последовательно выполняет следующие действия:

- формирование целей измерений;
- формулирование названия МВИ;
- выбор способа выражения погрешности измерений, при котором её значение характеризует степень достижения поставленной цели;
- проведение предварительного анализа объекта измерений, выбор вида математической модели исследуемого объекта (процесса);
- априорное определение числовых значений параметров математической модели, диапазона возможных значений;
- обоснование допустимой погрешности измерений (требуемой точности);
- выбор принципа измерений, т.е. выбор совокупности физических, химических, биологических и других явлений, на основе которых предполагается проводить измерения;
- выбор метода измерений
- выбор способа измерений (контактный, бесконтактный, непрерывный, периодический и др.);
- анализ реальных условий измерений, учёт влияющих факторов и неинформативных параметров (выбор модели функций влияния);
- выбор модели преобразования входного сигнала измерительным устройством и на её основе выбор необходимых СИ;
- выбор способа (алгоритма) обработки результатов измерений;
- получение результата измерений;
- оценка достоверности результатов измерений по разработанной МВИ.

Перечисленные действия при решении измерительной задачи МИ и их последовательность представлены на структурной схеме (рис. 13).

Процесс разработки МВИ, его основные этапы можно интерпретировать эволюцией погрешности на этих этапах, в т.ч. ошибками разработчика при выборе моделей, метода, способа и др., как аргументов результирующей погрешности. Такая абстракция, не связанная с реальным временем, позволяет анализировать процесс разработки МВИ и на конечном этапе оценить результирующую погрешность. Целью такого анализа является установление закона накопления погрешности на последовательных этапах.

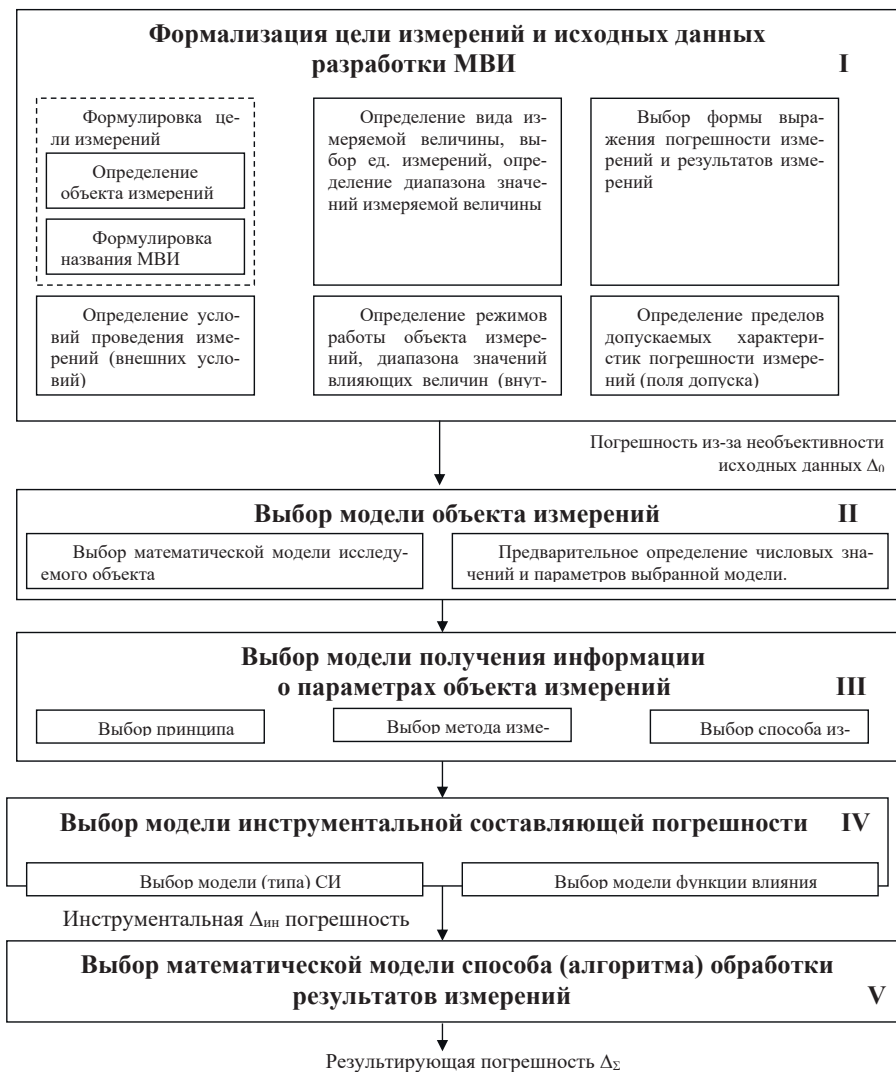


Рисунок 13 – Структурная схема этапов разработки методик выполнения измерений:

I – формализации целей измерений и исходных данных для разработки МВИ;

II – выбор модели объекта измерений;

III – выбор модели получения измерительной информации о параметрах объекта измерений;

IV – выбор модели инструментальной составляющей погрешности;

V – выбор математической модели (алгоритма) обработки результатов измерений

Проведённые исследования процесса разработки МВИ позволили выделить пять основных блоков решения измерительной задачи, в которых происходит «накопление» основной погрешности.

На этих этапах соответственно применяются следующие математические модели:

- математическая модель объекта (параметра) измерений;
- математическая модель «закона» или функциональной зависимости измеряемого параметра, на основе которого предполагается определять параметры объекта измерений;
- математическая модель метода получения информации об измеряемом объекте (прямые, косвенные измерения, измерения с использованием вторичного процесса);
- математическая модель СИ (алгоритма измерений данным прибором или измерительной системой);
- алгоритм обработки результатов измерений.

В общем виде процесс анализа неадекватности модели и реально го входного сигнала, его преобразование в процессе измерений можно описать математическим аппаратом теории множеств.

Пусть $X_P(t, a, b)$ – входной сигнал (t – время, a – вектор информативных параметров, b – вектор неинформативных параметров), принадлежащий множеству X .

W_i^u – идеализированный оператор преобразования реального сигнала или реальной функциональной зависимости f_i^P в приемлемые для анализа модель f_i^u .

$i = (1, n)$, где n – число преобразований при получении результата измерений по данной МИ.

W_i^P – реальный оператор математического или физического преобразования (оператор прибора) входного сигнала или реальной функциональной зависимости f_i^P .

Каждый элемент W_i множества операторов W_i ($i = 1, n$) отображает преобразование входного сигнала последовательно в результат измерений $y \in Y$.

При анализе неадекватности модели и реального измеряемого сигнала или функциональной зависимости важно оценить влияние неинформативных параметров на результат измерения, их предельные значения при достижении верхней или нижней границы поля допуска. Результаты преобразований при идеализированном входном

сигнале X_p и реальном входом воздействия X_p оценивают по одному из критериев p , характеризуемому определённой функцией потерь.

В общем виде предельное значение неинформативного параметра имеет вид:

$$b_g = \arg \max \left\{ \begin{array}{l} p[W_i^u X_u; W_i^p X_p(t, b_i, a)] \\ \sup p \\ \inf p \end{array} \right\},$$

где B – множество значений неинформативных параметров; значение $\sup p$ соответствует верхнему пределу Δ_b поля допуска; значение $\inf p$ соответствует нижнему пределу Δ_n поля допуска.

В частном случае критерий p может совпадать с относительной или абсолютной погрешностью измерений, например, $p(u = a_g - a_i)$, где a_g – действительное значение измеряемой величины.

В общем случае оценку адекватности реального процесс измерения и принятой моделью, т.е. оценку составляющих погрешности на каждом этапе преобразования $i = (1, n)$ можно представить структурной схемой (рис. 14).

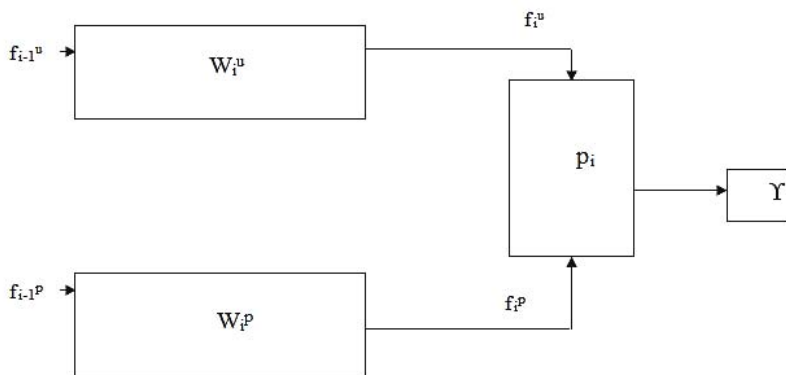


Рисунок 14 – Структурная схема оценки составляющих погрешности

Для формулировки общих подходов при определении составляющих погрешности измерений следует принять $W_i = 1$, т.е. $X_{вх} W_i^p = X_{вх}$.

В частном случае при прямых измерениях, когда $a = a_1$, измеряемая величина непосредственно по показанию прибора и соответственно:

$$W_{(i+1)} = W_{(i+1)}^u = 1.$$

Оценивание погрешности измерений начинается с анализа возможных источников погрешности.

Погрешность измерений, как правило, представляют в виде суммы трех составляющих:

Δ_m – методическая составляющая;

$\Delta_{ин}$ – инструментальная составляющая;

$\Delta_{оп}$ – составляющая погрешности вносимая оператором (субъективная погрешность).

Δ_m формируется на этапах I, II, III, $\Delta_{ин}$ – на этапе IV, $\Delta_{оп}$ формируется в основном на этапе V.

Типичные составляющие методической погрешности обусловлены:

- неадекватностью принятой модели объекта измерений реальному объекту.
- неадекватностью принятой модели влияющих величин их реальным объекту;
- погрешностью вследствие эффекта квантования;
- отличием алгоритма вычислений от функций связывающей результаты наблюдений с измеряемой величиной.

Типичные составляющие инструментальной погрешности обусловлены следующими факторами:

- 1) динамические составляющие из-за изменения измеренной величины в процессе измерения (погрешность, вызываемая инерционностью средства измерений);
- 2) погрешность вследствие ограниченной разрешающей способности средства измерений;
- 3) погрешности, вызываемые взаимодействием средства измерений с объектом измерений;
- 4) погрешность передачи измерительной информации;
- 5) погрешность градуировки средства измерений.

Типичные составляющие погрешности оператора:

- 1) погрешность округления результата измерений;

2) погрешность считывания значений измеренной величины с отчётного устройства;

3) погрешность интерполяции измеренной величины со шкал и диаграмм;

4) погрешности, вызванные воздействием оператора на объект и измерительный прибор (искажения температурного поля, механические воздействия и т.д.)

Как отмечалось выше, разработка МВИ включает метрологическую экспертизу материалов разработки этой методики.

Метрологическая экспертиза материалов разработки МВИ проводится посредством анализа и оценки выбора методов и средств измерений, проверки правильности выполненных расчётов результирующей погрешности измерений с целью установления соответствия МВИ предъявленным метрологическим требованиям.

Ошибки разработчика МВИ при метрологической экспертизе естественно оценивать альтернативным критерием: «правильное решение» – «неправильное решение», т.е. использовать качественные оценки. Однако, исходя из общности подходов анализа составляющих результирующей погрешности, при качественной оценке соответствующих действий разработчика МВИ в процессе экспертизы целесообразно воспользоваться тривиальной метрикой

$$p(\Delta_g, X) = \begin{cases} 0, & \text{если принято «правильное решение»} \\ \Delta_g, & \text{если принято «неправильное решение»} \end{cases}$$

где X – множество возможных значений исследуемых величин или функциональных зависимостей.

Для иллюстрации изложенного подхода при анализе составляющей погрешности и ошибок при решении измерительной задачи для гипотетического случая возможных значений составляющих погрешности воспользуемся графиком (диаграммой) (рис. 15).

По оси ординат приведены значения Δ_l составляющих погрешности, а по оси абсцисс – соответствующие этапы разработки и применения МВИ. На рисунке 15 выделены пять областей:

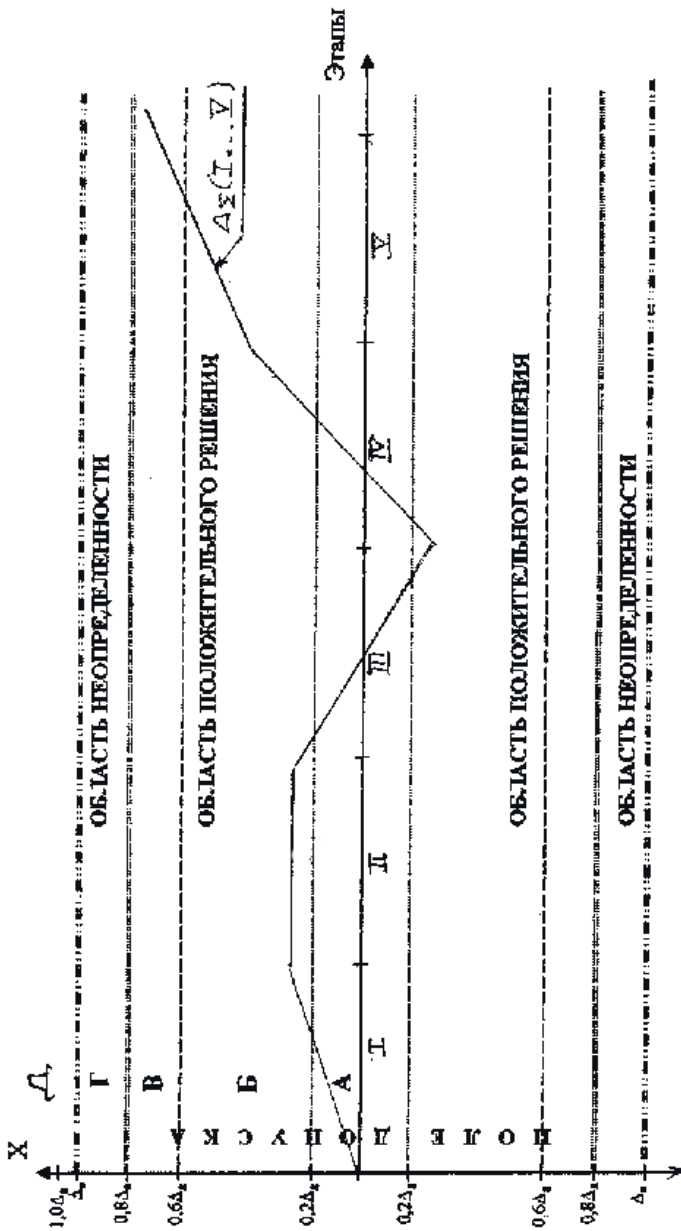


Рисунок 15 — Схема ошибок и составляющих результирующей погрешности измерений, иллюстрирующая эволюцию погрешности МВИ

А – значения характеристик погрешности измерений не превышают 20% от пределов их допустимых значений;

Б – значения характеристик погрешности измерений находятся в интервале 20... 60% соответствующих пределов допускаемых значений;

В – значения характеристик погрешности измерений находятся в интервале 60... 80% соответствующих пределов допускаемых значений;

Г – значения характеристик погрешности измерений находятся в интервале 80... 100% соответствующих пределов допускаемых значений;

Д – значения характеристик погрешности измерений выходят за предел их допускаемых значений.

Как показывают исследования, рассчитанные характеристики погрешностей отличаются от реальных, как правило, на 20%. Это допустимое отклонение при анализе рассчитанных погрешностей регламентировано и нормативными документами [РД50 -453-84 «МУ. Характеристики погрешности СИ в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета», МИ 1730-87 «МИ. ГСИ. Погрешности косвенных измерений параметров процессов. Методы расчета», МИ 1967-89 и др.]

Поэтому указанное значение допустимых отклонений рассчитанного значения результирующей погрешности можно использовать в качестве одного из критериев принятия решений по результатам метрологической экспертизы МВИ.

На рисунке 15 выделена особая зона – «зона неопределённости», заключённая между значениями $\Delta_i = 0,6\Delta_g$ и $\Delta_i = \Delta_g$ «допустимой погрешности» МВИ. При попадании характеристик погрешностей измерений в эту область разработчику МВИ следует рассмотреть вопрос об уменьшении погрешности МВИ.

В этом случае задача метрологической экспертизы МВИ может быть сведена к задаче идентификации качественных состояний МВИ по выбранным признакам.

Решение этой задачи возможно методами теории распознавания образов (классов). Исходя из целей метрологической экспертизы МВИ, очевидно выделить три класса качества исследованных методик.

1. МВИ – удовлетворяет предъявленным требованиям в качестве нормативного документа.

2. МВИ – требует более тщательного исследования с привлечением дополнительных данных, в т.ч. и экспериментальных для окончательного решения по результатам экспертизы (признаки распознавания находятся в области неопределённости).

3. МВИ – не удовлетворяет предъявленным требованиям для положительного решения по экспертизе (признаки распознавания находятся вне зоны допустимых значений).

В теории распознавания образов (классов) процедура выбора признаков распознавания в основном нашли эвристический характер. Обычно исследователям МВИ более доступна информация о значениях отдельных составляющих результирующей погрешности Δ_{Σ} , поэтому признаком отношения МВИ к одному из классов целесообразно принять факт, попадания значений погрешности в приведённые области А, Б, В, Г, Д.

Анализ результатов многочисленных метрологических экспертиз МВИ показал, что распределение признаков распознавания классов МВИ можно сгруппировать в конечное число следующих вариантов.

1. Значение составляющих погрешности измерений Δ_i находится в области А.

Принимается решение: МВИ первого класса (положительный результат экспертизы).

2. Значения составляющих погрешностей измерений Δ_i находятся в области А, Б, в этом случае необходимо использовать второй признак - Δ_{Σ} , при этом если

а) $\Delta_{\Sigma} \leq 0,8\Delta_g$, то решение: МВИ первого класса (положительный результат экспертизы);

б) $\Delta_{\Sigma} = 0,8 \dots 1,0\Delta_g$, то решение: МВИ второго класса (необходимы дополнительные исследования);

в) $\Delta_{\Sigma} > \Delta_g$, то решение: МВИ третьего класса (отрицательный результат экспертизы).

3. Значения составляющих погрешностей измерений Δ_i находятся в области А, Б, В, если

а) $\Delta_{\Sigma} < \Delta_g$, то решение: МВИ второго класса (необходимы дополнительные исследования);

б) $\Delta_{\Sigma} > \Delta_g$, то решение: МВИ третьего класса (отрицательный результат экспертизы).

4. Значения составляющих погрешностей измерений Δ_i находятся в области G , тогда решение: МВИ третьего класса (отрицательный результат экспертизы).

7.4. Аттестация методик выполнения измерений

Аттестация (от латинского attestatio – свидетельство) означает определение квалификации работника, уровня знания, отзыв, характеристика. В свою очередь аттестовать – это дать характеристику кого-либо (чего-либо).

В метрологической практике давно используется понятие аттестации по отношению к средствам измерения. Так, метрологическая аттестация средств измерения – это признание метрологической службой узаконенным для применения средства измерения единичного производства (или ввозимого единичными экземплярами из-за рубежа) на основании тщательных исследований его свойств. Основу технического аспекта этого определения составляет «тщательное исследование» метрологических свойств этих средств.

Что касается методик измерений, то её основой в отличие от приборов, является регламентированная технология выполнения измерений.

Аттестация МВИ – это процедура исследования и подтверждения соответствия МВИ предъявленным к ней метрологическим требованиям к измерениям. Для более понятного и легко запоминающегося определения в узком смысле можно сказать, что аттестация МВИ – исследования, направленные на определение показателей точности измерений, выполняемых в соответствии с данной методикой.

На основе результатов исследований делается вывод о соответствии МВИ заданным требованиям или приписанным характеристикам (допустимой погрешностью).

В обязательном порядке подлежат аттестации МВИ, применяемые в сфере распространения государственного метрологического контроля и надзора, а также для контроля состояния сложных технических систем, на которые распространяется ГОСТ Р 22.2.004-2012 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные аварии и катастрофы. Метрологическое обеспечение контроля состояния сложных технических систем. Основные положения и правила».

Методики измерений, применяемые вне сферы распространения государственного метрологического контроля и надзора, аттестуются по правилам, установленным в ведомстве или на предприятии.

Аттестацию МВИ осуществляют метрологические службы и иные организационные структуры (юридические лица), разрабатывающие или применяющие МВИ, которые аккредитованы на право выполнения аттестации МВИ.

Аккредитованная на право аттестации МВИ метрологическая служба (структура) может выполнять аттестацию МВИ, как правило, на договорной основе и для других предприятий, применяющих данную методику.

Аттестация МВИ осуществляется тремя способами или их комбинацией путём:

- метрологической экспертизы материалов разработки МВИ;
- теоретических исследований;
- экспериментальных исследований МВИ.

Выбор способа аттестации определяется сложностью МВИ, опытом метролога-эксперта в данной области измерений, наличием испытательного оборудования и средств измерений.

В значительной мере объём аттестационных работ определяется экономическими и временными ресурсами. Поэтому аттестация МВИ должна проводиться в объёме, требуемом для определения погрешности измерений и проверки соответствия этой погрешности требованиям на разработку МВИ.

На аттестацию МВИ представляют:

- исходные требования (ТЗ, ТУ) на разработку, в т.ч. требования к точности измерений, область (диапазон) измеряемой величины и условия измерений;
- документ или проект документа на МВИ, регламентирующий технологию измерений;
- программу и результаты экспериментального или расчётного определения характеристик погрешности измерений.

Как правило, результаты определения характеристик погрешности измерений представляют в виде протоколов или отчётов.

Аттестация проводится по программе, утверждённой руководителем организации, проводящей аттестацию МВИ.

Программа метрологической аттестации МВИ должна содержать:

- наименование аттестуемой методики (на титульном листе);
- цель метрологической аттестации МВИ;
- указание места проведения аттестации и привлекаемые силы;
- указание средств измерений, которые будут использованы при проведении метрологической аттестации МВИ (если аттестация будет осуществляться аналитическим или расчётным методами, то необходимо указать эти методы);
- перечень работ, проводимых в ходе аттестации МВИ, какими методами будут осуществляться работы с указанием исполнителей.

Примечание. Допускается объединять указанные разделы или изменять их наименования, а также включать дополнительные разделы с учётом специфики измерений.

Отчёт об определении погрешности измерений по данной методике расчётным или экспериментальным путём оформляется разработчиком МВИ в произвольной форме.

Наиболее распространенным методом аттестации является метрологическая экспертиза документов на ВИ, включая отчёт об определении погрешности измерений по данной методике.

Метрологическая экспертиза МВИ – анализ и оценка выбора методов и средств измерения, операций и правил проведения измерений и обработки их результатов с целью установления соответствия МВИ предъявляемым метрологическим требованиям.

Проекты государственных стандартов, в которых излагаются МИ, предназначенные для применения в сфере распространения государственного метрологического надзора (ГМН), должны подвергаться МЭ в государственных научно-метрологических центрах (ГНМЦ) в соответствии с ГОСТ Р 1.11-2003.

Другие документы на МИ, применяемые в сферах ГМН, подвергают метрологической экспертизе в ГНМЦ по согласованию между Росстандартом и ведомствами или предприятиями ГНМЦ.

Документы на МИ, не используемые в сферах распространения ГМН, подвергают метрологической экспертизе в порядке, установленном в отрасли или на предприятии.

При проведении МЭ документов на МВИ целесообразно использовать РМГ 63-2003 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации».

Метрологическую экспертизу материалов по разработке МВИ целесообразно проводить в следующей последовательности.

1. Проверяют комплектность документов, представляемых на МЭ. В комплект документов входят:

- исходные требования (техническое задание) на разработку МВИ;
- документ (проект документа) на МВИ;
- программы и результаты экспериментального или расчётного оценивания характеристик погрешности измерений;
- отчёт по результатам исследования на этапе разработки или опробования МВИ;
- другие документы разработки и исследования МВИ (например, программное обеспечение при использовании вычислительной техники).

2. Анализируют достаточность и полноту исходных данных, необходимых для разработки МВИ и для оценивания характеристик погрешностей измерений, которые будут приписаны МВИ. Основные исходные данные приведены в ГОСТ Р 8.563-2009, в их числе следующие:

- назначение МВИ (область применения, наименование измеряемой величины, пределы измерений, характеристики измеряемой величины, характеристики объекта измерений, если они могут влиять на погрешность измерений и др.);
- требования к погрешности измерений (в ряде НД приводятся требования к погрешности измерений, часто на практике используют соотношение между допускаемой погрешностью измерений и границей поля допуска), способы выражения требований к погрешности измерений должны соответствовать рекомендациям МИ 1317-2004;
- условия измерений (температура, влажность, давление окружающей среды, другие влияющие величины), условия измерений могут быть заданы в виде номинальных значений и (или) границ диапазонов возможных значений влияющих величин;
- требования к автоматизации измерительных процедур;
- требования к обеспечению безопасности выполнения работ;
- другие требования в соответствии со спецификой МВИ.

3. Анализируют НД, на которые даны ссылки в материалах на МВИ, проверяют, не истек ли срок их действия, выявляют неуказанные НД.

4. Проверяют правильность метрологической терминологии (в соответствии с РМГ 29-2013 и другими стандартами, устанавливающими термины и определения в конкретных областях измерений) и правильность наименований и обозначений величин и их единиц (в соответствии с требованиями ГОСТ 8.417-2002).

5. Оценивают правильность выбора (разработки) метода и средств измерений. При этом целесообразно пользоваться рекомендациями МВИ 1967-89 «ГСИ. Выбор методов и средств при разработке методик выполнения измерений. Общие положения».

6. Анализируют полноту учёта всех факторов, влияющих на погрешность выполнения измерений; оценивают обоснованность допущений, принятых при разработке МВИ.

7. Анализируют и оценивают полноту выявления и учёта составляющих погрешности измерений (типичные источники и составляющие погрешности измерений приведены в приложении А ГОСТ Р 8.563-2009).

8. Анализируют выбор способа оценивания характеристик составляющих погрешностей и способа их суммирования. При исследовании погрешности используют следующие процедуры оценивания погрешностей измерений: расчётный, экспериментальный или расчётно-экспериментальный. При оценивании погрешностей целесообразно использовать рекомендации ГОСТ 8.736-2011, Р 50.2.038-2004, МИ 2083-90, РМГ 61-2003.

9. Анализируют и оценивают полноту и обоснованность процедуры подготовки и выполнения измерений.

10. Устанавливают целесообразность и возможность повышения точности измерений по анализируемой МВИ.

11. Устанавливают возможность контроля точности измерений и анализируют процедуру такого контроля.

В соответствии со спецификой МВИ могут анализироваться и оцениваться и другие вопросы.

При метрологической экспертизе документов, регламентирующих МВИ, необходимо:

1) установить, относится ли данная МВИ к сферам распространения ГМН (ст. 13 Закона РФ «Об обеспечении единства измерений»);

2) установить соответствие анализируемой МИ требованиям ГОСТ Р 8.563-2009:

- корректность наименования МВИ;
 - наличие всех необходимых разделов;
 - корректность наименования разделов;
 - полноту и правильность изложения всех разделов;
- 3) установить наличие (или отсутствие) численных характеристик погрешностей измерений;
 - 4) оценить обоснованность приписанных характеристик погрешности измерений;
 - 5) проверить выполнение требований в части условий измерений;
 - 6) установить соблюдение требований к СИ, используемых при выполнении измерений;
 - 7) оценить обоснованность и правильность выбора СИ по точности;
 - 8) проверить полноту и правильность изложения требований к вспомогательным устройствам, стандартным образцам (СО), аттестованным смесям, реактивам;
 - 9) проверить полноту и правильность изложения алгоритма подготовки и выполнения измерений;
 - 10) оценить возможность контроля точности получаемых результатов измерений по данной МВИ;
 - 11) проверить полноту и правильность изложения требований по технике безопасности и охране окружающей среды;
 - 12) проверить соответствие применяемых терминов и обозначений величин и их единиц требованиям НД.

Если в ходе проведения экспертизы отчёта о метрологической аттестации МВИ будет установлено, что реальная погрешность измерений соответствует заявленной в документе на МВИ, то методика признаётся аттестованной, как удовлетворяющая всем необходимым требованиям.

Если в процессе экспертизы будет установлено, что реальная погрешность измерений превышает заявленную в документе на МВИ или выбранные методы оценки погрешности МВИ не позволяют получить достоверные результаты, то такая методика не признаётся аттестованной и отправляется с замечаниями на доработку организации, представившей документы на метрологическую экспертизу.

После устранения выявленных замечаний и недостатков проводится повторная экспертиза документа на МВИ.

По результатам метрологической аттестации МВИ составляется заключение (отчёт), утверждаемое руководителем организации, проводящей аттестацию.

Отчёт о результате аттестации МВИ оформляется исполнителем, проводившим аттестацию в произвольной форме. В отчёте должны быть отражены следующие вопросы:

- наименование подразделения, проводившего аттестацию МВИ;
- указание полного наименования МВИ, которая была представлена на метрологическую аттестацию;
- указание недостатков, нарушений требований руководящих документов (если таковые имеют место);
- анализ соответствия реальной погрешности измерений, погрешности, заявленной в документе на МВИ;
- выводы по результатам метрологической аттестации МВИ (признана МВИ аттестованной или нет);
- дата и подпись исполнителей, непосредственно проводивших аттестацию МВИ.

При положительных результатах аттестации документ, регламентирующий МВИ, утверждается в установленном порядке. В этом документе указывается «МВИ аттестована метрологической службой (организацией)», проводившей аттестацию.

Для МВИ, применяемых в сфере государственного контроля и надзора, оформляется свидетельство об аттестации.

7.5. Критерии отнесения методик выполнения измерений к методикам, подлежащим аттестации

В соответствии с Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» методики выполнения измерений подлежат аттестации в порядке, установленном ГОСТ Р 8.563-2009 «ГСИ. Методики (методы) измерений». При практическом применении положений ГОСТ Р 8.563-96 часто встает вопрос об отнесении Методик измерений к аттестуемым или к не подлежащим аттестации. Для этого необходимы критерии, позволяющие однозначно ответить на этот вопрос.

Критерии отнесения МВИ к методикам, подлежащим аттестации, базируются на отличительных признаках, на основе которых следует

принимать решение о необходимости их аттестации. В ГОСТ Р 8.563-2009 установлены следующие отличительные признаки:

- область применения;
- сроки введения в действие (разработки) МИ;
- порядок (момент) определения погрешности измерений.

На основе этих признаков можно сформулировать критерии отнесения МВИ к методикам, подлежащим аттестации.

1. Критерий, учитывающий полноту изложения требований и операций в документе на методики измерений. Методики измерений, используемые вне сфер государственного метрологического контроля и надзора, не подлежат аттестации (или аттестуются порядком, установленным ведомством, разрабатывающим и применяющим эти МВИ).

2. Критерий, учитывающий наличие и обоснованность показателей точности.

3. Критерий, учитывающий соответствие требованиям нормативных правовых документов в области обеспечения единства измерений. Методики измерений подлежат аттестации в случае, если характеристики погрешности измерений определяются до их использования. Методики измерений не подлежат аттестации в случае, если характеристики погрешности измерений определяются в процессе измерений или после их применения.

Эти критерии являются формальными и представленных пояснений для их однозначной трактовки более чем достаточно.

Однако практика показала, что имеющихся в ГОСТ Р 8.563-2009 формальных признаков отнесения МВИ к классу аттестуемых недостаточно. Поэтому предлагается дополнить формальные признаки техническим отличительным признаком, учитывающим значения и соотношения составляющих результирующей погрешности измерений.

Как известно, обязательными компонентами всякого измерения являются метод измерения и средства измерения (СИ). Кроме того, в большинстве случаев измерения выполняются с участием человека. При этом несовершенство каждого компонента вносит вклад в погрешность измерения. Поэтому в общем виде погрешность результата измерений можно представить в виде:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{М}} + \Delta_{\text{К}} + \Delta_{\text{Оп}},$$

где Δ_M – погрешность методическая; Δ_K – погрешность инструментальная; Δ_{Op} – погрешность оператора (субъективная погрешность).

Очевидно, что если погрешность метода и оператора пренебрежимо малы по сравнению с погрешностью используемых СИ, то погрешность результата определяется погрешностью используемых СИ. Этот случай характерен для однократных прямых измерений, где результат измерения определяется непосредственно по показанию прибора. При этом, учитывая, что погрешность СИ подтверждена при утверждении типа и при периодической проверке, аттестация МВИ, имеющая своей целью подтверждение погрешности результата измерений, теряет смысл.

Исходя из этого, можно поставить вопрос о целесообразности аттестации МВИ в зависимости от величины и соотношения составляющих результирующей погрешности измерений. Для решения этого технического вопроса необходимо определить критерии ответственности составляющих погрешности измерений.

Один из подходов при разработке критерия значимости составляющих погрешности измерений может быть связан с влиянием округления результата измерений и формой выражения метрологических характеристик. Важным требованием единообразия СИ является то, что пределы допускаемых погрешностей должны быть выражены не более чем двумя значащими цифрами. Вполне очевидно, что числовое значение результата измерения должно быть представлено так, чтобы оно оканчивалось знаком того же разряда, что и значение его погрешности. При этом очень часто необходимо округлять результат измерений. Если руководствоваться этими правилами, то предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения.

Проведём оценку влияния результата округления в зависимости от числа значащих цифр записи результата измерений. Известно, что любая запись результата измерений в виде действительных чисел может быть представлена суммой сомножителей натуральных чисел A_j , изменяющихся от 0 до 9, умноженных на 10^j , где j – целое число, соответствующее разряду значащей цифры результата измерений. Пусть число значащих цифр равно s . Тогда численное значение результата $\{A\}$ представим в виде суммы:

$$\{A\} = A_1 \cdot 10^n + A_2 \cdot 10^{n-1} + \dots + A_s \cdot 10^{n-s+1},$$

где n – показатель степени старшего разряда; $A_1 \neq 0$.

Согласно принятым правилам округления абсолютная предельная погрешность от округления равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения:

$$\Delta_{\text{окр}} = \frac{1}{2} \cdot 10^{n-s+1}.$$

Относительную погрешность результата измерения определим из выражения:

$$\delta_{\text{окр}} = \frac{\Delta_{\text{окр}}}{A_1 \times 10^n} = \frac{1}{2 \times A_1} \times 10^{1-s}.$$

Поскольку $1 \leq A_1 \leq 9$, то при двух значащих цифрах результата измерений ($s = 2$) предельная погрешность округления находится в интервале $0,6\% \leq \delta_{\text{окр}} \leq 5\%$, при трех $0,06\% \leq \delta_{\text{окр}} \leq 0,5\%$ и т.д.

Таким образом, если руководствоваться принятыми правилами округления, то при определении допускаемой погрешности измерений с точностью двух значащих цифр, максимальная погрешность от округления не превысит 5%.

Аналогичная рассмотренной задаче определения погрешности округления является задача оценки погрешности оператора, связанная с процедурой снятия показаний со шкалы стрелочных приборов или приборов со световой индикацией. При этом оператору, как правило, необходимо интерполировать результат измерений, если стрелка (световой индикатор) находится между нанесенными на шкалу делениями.

При нормированном нанесении делений (отметок) на шкалу приборов абсолютная погрешность интерполяции «среднего» оператора составляет от 10% до 20% от цены деления шкалы α , т.е. для оптимистического уровня

$$\Delta_{\text{инт}} = 0,1 \cdot \alpha.$$

Проведём оценку погрешности интерполяции в зависимости от допускаемой погрешности прибора Δ_d . Так, ГОСТ 5365-83 «Приборы электроизмерительные. Циферблаты и шкалы» устанавливает, что минимальное значение l_1 длины деления шкалы должно быть не менее 0,5 расстояния l_2 по шкале, соответствующего абсолютному зна-

чению предела допускаемого Δ_d значения погрешности прибора. Это означает, что при нанесении делений на шкалу прибора необходимо соблюдать следующее соотношение:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\alpha}{\Delta_d} \geq 0,5.$$

С учётом этого, абсолютная погрешность интерполяции при снятии показаний со шкалы прибора составит:

$$\Delta_{\text{инт}} = 0,1 \cdot \alpha = 0,05 \cdot \Delta_d.$$

Это означает, что $\Delta_{\text{инт}}$ составляет до 5% значения допускаемой погрешности прибора.

Таким образом, проведённые расчёты показали, что погрешность округления и погрешность интерполяции показаний прибора может составлять до 5% от допускаемой погрешности измерений. Это значение погрешности было положено в основу критерия значимости различных составляющих результирующей погрешности МВИ.

Для установления критерия существенности составляющих погрешности представим результирующую погрешность в виде суммы не исключённых составляющих, причём методическую погрешность Δ_M и погрешность оператора $\Delta_{\text{оп}}$ представим частью инструментальной погрешности:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_K + \Delta_M + \Delta_{\text{оп}} = \Delta_K + \lambda \Delta_K + \varphi \Delta_K = \Delta_K(1 + \lambda + \varphi),$$

где $\lambda = \overline{0,1}$ и $\varphi = \overline{0,1}$.

В общем случае границы погрешности результата измерений $\Delta_{\Sigma d}$ определяют посредством построения композиции распределений её составляющих. При отсутствии дополнительной информации составляющие погрешности рассматриваются как случайные величины, имеющие равномерное распределение (при известных границах равномерное распределение обладает максимальной энтропией). При равномерном распределении составляющих погрешности её границы (без учёта знака) вычисляют по формуле

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

где Δ_i – составляющие результирующей погрешности; n – число суммируемых погрешностей; K – поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью P .

В данном случае:

$$\Delta_{\Sigma D} = K \Delta_K \sqrt{1 + \lambda^2 + \varphi^2} .$$

Следует отметить, что выражение для оценивания границы допускаемой погрешности МИ получено при условии, что сумма составляющих погрешностей Δ_i не должна превышать эти границы с вероятностью:

$$P \left\{ \sum_{i=1}^n \Delta_i \leq \Delta_{\Sigma D} \right\} > 0,9 .$$

Это означает, что всегда должно выполняться условие

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i \leq \Delta_{\Sigma D} .$$

Если число суммируемых погрешностей равно четырём или менее четырёх ($n < 4$), то поправочный коэффициент K определяют по графику зависимости $K = f(n, l)$ от изменения одного из слагаемых Δ_j по отношению к остальным, т.е. $l = \Delta_j / \Delta_0$, приведённому в ГОСТ 8.736-2011 (рис. 16).

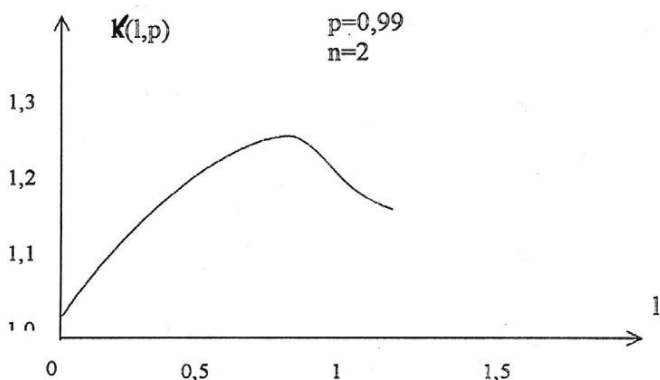


Рисунок 16 – График зависимости $K = f(n, l)$

Рассмотрим случай, когда погрешность оператора (субъективная погрешность) в методике не присутствует, т.е. $\varphi = 0$.

Если изменения прямые, то границы допустимой погрешности МВИ можно вычислить по формуле

$$\Delta_{\Sigma Д} = k\sqrt{\Delta_k^2 + \Delta_M^2} = \Delta_k \cdot k\sqrt{1 + \lambda^2}.$$

Пусть при оценке границы допустимой погрешности не учитывается методическая составляющая погрешности. В этом случае относительная погрешность (определения) границы допустимой погрешности определяется из выражения:

$$\delta = \frac{|\Delta_{\Sigma Д} - \Delta_k|}{\Delta_{\Sigma Д}} \cdot 100\%.$$

Значение K определим из графика, приведённого в ГОСТ 8.736-2011 для $n = 2$ и соответствующих $l = \lambda = 0,1 \dots 0,25$, $P = 0,99$.

Значения относительной погрешности измерений δ из-за не учёта методической составляющей, вычисленные по формуле, приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Значения относительной погрешности измерений δ при разных l

Параметры	Значения относительной погрешности измерений δ при разных l				
$\frac{\Delta_M}{\Delta_k}$ $l = \lambda =$	0,1	0,15	0,17	0,2	0,25
K	0,99	1,01	1,03	1,05	1,1
$\delta\%$	0,5	2,0	4,3	6,5	11,7

Проведённые вычисления показали, что в случае, когда методическая составляющая погрешности не превышает 17% от значения инструментальной составляющей

$$\Delta_{\Sigma Д} < 0,17\Delta_k,$$

то с доверительной вероятностью $P = 0,99$ при определении допускаемой погрешности МВИ методической составляющей можно пренебречь. При этом относительная погрешность определения граничных значений Δ_{Σ} из-за не учёта методической составляющей Δ_M не превысит 4,3%, что соизмеримо с погрешностью от округления результата измерений (5%).

Таким образом, можно сделать вывод, что при прямых измерениях, когда результирующая погрешность в основном определяется инструментальной составляющей погрешности, МВИ можно не аттестовывать.

Наряду с этим, анализ современных способов измерений и обработки измерительной информации [4,5,6] показал, что в результате применения МВИ возможна ситуация, когда результирующая погрешность измерений по своему значению меньше погрешности применяемых СИ. Этот неочевидный результат характерен для сложных измерений, предусматривающих процедуру исключения или уменьшения влияния аддитивных и мультипликативных составляющих погрешности. При этом применяются, как правило, нетрадиционные способы обработки результатов измерений, требующие специальной метрологической подготовки персонала измерителей. Такие МВИ следует относить к МВИ, подлежащим аттестации. Это требование также необходимо включить в четвертый критерий в виде условия проверки выполнения неравенства

$$\Delta_{\Sigma} < \Delta_k .$$

Таким образом, четвертый критерий можно выразить в виде алгоритма, представленного на рисунке 17.

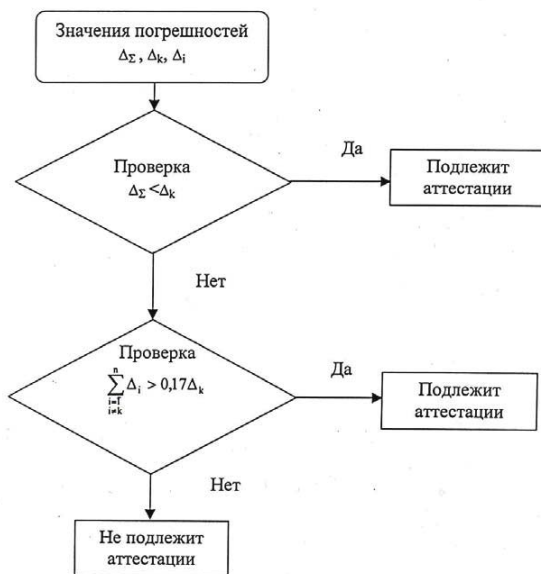


Рисунок 17 – Применение критериев отнесения МВИ к классу аттестуемых

При решении вопроса об отнесении методики выполнения измерений к аттестуемым или не подлежащим аттестации проверку критериев необходимо осуществлять в порядке их представления, т.е. от простых к сложным:

- область применения;
- сроки введения в действие (разработки) МВИ;
- порядок (момент) определения погрешности измерений;
- значения и соотношения составляющих результирующей погрешности измерений.

Если по всем критериям принимается решение: «МВИ подлежит аттестации», – то её необходимо аттестовывать. В случае если хотя бы по одному из критериев принимается решение: «МВИ аттестации не подлежит», – то методику выполнения измерений не аттестуют (или аттестуют в соответствии с порядком, установленным ведомством, разрабатывающим и применяющим эти МВИ).

Результаты отнесения МВИ к аттестуемым или не подлежащим аттестации должны отражаться в документе (техническом задании,

технических условиях, договоре на проведение работ и др.), содержащем исходные данные для разработки МВИ.

7.5.1. Пример применения критериев отнесения МВИ к методикам, подлежащим аттестации

«Методика выполнения измерений действующего выходного синусоидального напряжения на выходе проводной линии связи» предназначена для проведения измерения действующего значения синусоидального напряжения $U_{\text{вых}} = 10\text{В}$ в диапазоне частот $f = 5..7$ кГц.

Выходное сопротивление линии связи $R_{\text{вых}} = 600$ Ом.

Коэффициент гармоник выходного сигнала:

- вариант №1 - $k_{1f} = 0,5$ %;
- вариант №2 - $k_{2f} = 1$ %.

Допускаемая погрешность измерения $\Delta_d = \pm 0,4\text{В}$ с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Условия измерений:

- температура воздуха, °С: 20 ± 5 ;
- влажность, %: 60 ± 20 ;
- атмосферное давление, кПа: $84..106,7$;
- напряжение электропитания в сети, В: 220 ± 5 ;
- частота переменного тока, Гц: $50 \pm 0,5$.

Разработчик предполагает применить метод прямых измерений и использовать для измерительного контроля цифровой вольтметр В7-22. Схема измерений $U_{\text{вых}}$ (рис. 18):

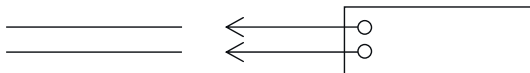


Рисунок 18 – Алгоритм проверки необходимости аттестации МВИ по значениям и соотношениям составляющих результирующей погрешности измерений

В7-22 позволяет измерять переменное напряжение на пределе «20В» с частотой до 10 кГц с погрешностью:

$$\delta_k = \pm(0,5 + 0,5 \frac{U_k}{U_x})\% ,$$

где U_k – предел измерения [0,2-2-20-200].

На пределе «20» относительная допустимая погрешность составляет $\delta_k = \pm 1,5\%$, а абсолютная погрешность $\Delta_k = \pm 0,3В$.

Цифровая индикация результатов измерения предполагает отсутствие погрешности оператора.

Результирующая погрешность МВИ определяется выражением:

$$\Delta \Sigma = 1,1 \sqrt{\Delta_k^2 + \Delta_M^2},$$

где Δ_M – методическая составляющая погрешности.

Проведем оценку методической составляющей погрешности Δ_M . Методическая составляющая погрешности обусловлена тем, что реальный измерительный сигнал не является строго синусоидальным, а представляет собой полигармоническое напряжение.

Очевидно мгновенное значение Δ_M :

$$\Delta_M(t) = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) - \sum_{i=1}^{\infty} U_i \sin(i\omega_1 t + \varphi_i),$$

где U_i – амплитуда i -ой гармоники; соответственно ω_i – частота и φ_i – фаза i -ой гармоники.

Поскольку В7-22 измеряет среднеквадратическое значение напряжения, то методическую составляющую погрешности определим как действующее значение за время измерений $T = 5$ сек.

$$\Delta_M = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) - \sum_{i=1}^{\infty} U_i \sin(i\omega_1 t + \varphi_i) \right]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=2}^{\infty} U_i^2} = 0,707 \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}.$$

Известно, что коэффициент гармоник определяется как:

$$K_f = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1}.$$

Тогда с учётом этого Δ_M определим из выражения:

$$\Delta_M = 0,707 k_f U_1.$$

В нашем случае $k_{1f} = 0,005$, $U_1 = 10В$, соответственно

$$\Delta_M = 0,005 \cdot 10 \cdot 0,707 = 0,035В.$$

Для второго варианта $k_{2f} = 0,01$, $U_1 = 10B$, соответственно

$$\Delta_M = 0,01 \cdot 10 \cdot 0,707 = 0,07B.$$

Приведённые данные по МВИ и результаты расчёта характеристик погрешности позволяют применить критерии по отношению проекта методики к I-му или II-му классу (Таблица 15).

Таблица 15 – Результаты расчёта характеристик погрешности по данным МВИ

Порядковый номер критерия в МУ	Отличительный признак	Решение по критерию о МВИ	Примечание
5.1.	Область применения: сфера обороны и безопасности	подлежит аттестации	
5.2.	Срок разработки: 2000г., т.е. после 1.07.97 г.	подлежит аттестации	
5.3.	Погрешность МВИ определяется до измерений	подлежит аттестации	
5.4.	Результирующая погрешность превышает значение инструментальной составляющей погрешности, а методическая составляющая в случае: $k_f = 0,5\%$ $\Delta_M < 0,17\Delta_k$ $(0,035B < 0,051B)$ в случае: $k_f = 1\%$ $\Delta_M > 0,17\Delta_k$ $(0,07B > 0,051B)$	не подлежит аттестации подлежит аттестации	

Вывод:

1. При значении $k_f = 0,5\%$ МВИ аттестации не подлежит.
2. При значении $k_f = 1\%$ МВИ аттестации подлежит.

7.6. Аккредитация организаций на право аттестации методик выполнения измерений

Метрологические службы (организационные структуры) организаций, осуществляющие аттестацию МВИ, должны быть аккредитованы на право выполнения аттестации МВИ.

Аккредитация организаций на право аттестации МВИ осуществляется на договорной основе государственными научными метрологическими центрами, органами Государственной метрологической службы Росстандарта. В настоящее время порядок аккредитации организаций на право аттестации МВИ определён правилами по метрологии РМГ 127–2013 «ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц» и является обязательным.

Аккредитация организаций на право аттестации МВИ направлена на обеспечение единства измерений, на проверку и официальное признание компетентности этой организации (организационной структуры предприятия) выполнять работы в указанной области.

Обычно аккредитация проводится на срок до пяти лет.

7.6.1. Условия аккредитации

При аккредитации организаций на право аттестации МВИ проверяется наличие условий, обеспечивающих необходимый уровень метрологических работ в заявленной области аккредитации.

Аккредитуемая организация должна иметь: организационную структуру (отдел, лабораторию, группу и т.п.), подготовленный персонал, испытательное оборудование, средства измерений и помещения, обеспечивающие проведение работ по аттестации МВИ.

Метрологическая служба организации должна иметь опыт работ по разработке и экспертизе МВИ в заявленной области аккредитации. Сотрудники, непосредственно участвующие в проведении аттестации, должны знать:

- формы представления результатов измерений;
- характеристики погрешностей измерений и формы их представления;
- способы использования характеристик погрешностей измерений для определения достоверности измерительного контроля параметров.

Такие сотрудники должны быть аттестованы в качестве экспертов-метрологов в порядке, установленном Росстандартом.

Испытательное оборудование, необходимое для проведения аттестации МВИ, должно быть аттестовано и иметь соответствующий аттестат.

При необходимости можно использовать испытательное оборудование и средства измерений других организаций в соответствии с заключенными договорённостями.

Все испытательное оборудование и средства измерений должны содержаться в условиях, обеспечивающих их сохранность и защиту от коррозии и преждевременного износа. Каждая единица испытательного оборудования, средств измерений должна быть учтена в регистрационной карточке или в другом документе, позволяющем установить их владельца. Регистрационный документ должен включать следующие сведения:

- наименование (тип);
- наименование изготовителя, заводской и инвентарный номер;
- дату получения и дату ввода в эксплуатацию;
- данные о проверке, аттестации, межпроверочный интервал.

Метрологическая служба должна располагать действующими нормативными документами, необходимыми для проведения аттестации МВИ. Условия хранения протоколов, отчётов и другой документации должны обеспечивать её сохранность и конфиденциальность.

Аккредитуемая организация должна располагать помещениями для проведения метрологических работ по аттестации МВИ, соответствующими по площади, состоянию и условиям санитарных норм, требованиям выполнения измерений и проверки приборов.

7.6.2. Порядок проведения аккредитации

Следует отметить, что аккредитация организаций на право аттестации МВИ осуществляется по их инициативе, но в соответствии с установленным Росстандартом порядком.

Заявитель на аккредитацию подаёт в аккредитуемую организацию заявку. Заявка должна содержать:

- описание области аккредитации с указанием области измерений, методики выполнения которых предполагается аттестовать;
- назначение и область применения аттестуемых МВИ.

К заявке должен прилагаться «Паспорт метрологического обеспечения организации» и «Положение о метрологической службе организации».

По решению аккредитующей организации для проведения работ по аккредитации создается комиссия, в состав которой привлекаются ведущие специалисты, специализирующиеся в области метрологической аттестации МВИ по данному виду или области измерений. Перечень основных метрологических работ при аккредитации организаций приведён в типовой программе по аккредитации.

Результаты работ по аккредитации излагаются в акте. На основании выводов, изложенных в акте, в случае положительного решения, аккредитующая организация направляет во Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС) для экспертного контроля следующие документы:

- паспорт метрологического обеспечения предприятия;
- акт по итогам проверки метрологической службы;
- оформленный аттестат аккредитации с приложением области аккредитации.

ВНИИМС после проведения экспертного контроля материалов аккредитации присваивает номер аттестату аккредитации и заносит в Реестр аккредитованных служб на право аттестации МВИ.

При отрицательных результатах аккредитующая организация сообщает организации-заявителю о замечаниях и предложениях по совершенствованию деятельности метрологической службы, которые должны быть реализованы организацией в согласованные сроки.

Аккредитация метрологических служб проводится в срок, как правило, не превышающий пяти лет. Инспекционный контроль деятельности аккредитованных метрологических служб проводится аккредитующей организацией не реже одного раза в 18 месяцев.

7.6.3. Программа выполнения работ по аккредитации метрологической службы на право аттестации методик измерений и проведения метрологической экспертизы документов

№ п/п	Наименование работ	Срок исполнения	Исполнитель
1	2	3	4
1.	Предварительные организационно-экспертные работы		
1.1	Подготовка заключения о целесообразности аккредитации организации на право аттестации МВИ		
1.2	Формирование комиссии для аккредитации		
1.3	Определение цены на выполнение работ по аккредитации в зависимости от объема работ и сроков выполнения		
1.4	Анализ представленных документов на соответствие нормативным документам (РМГ 127-2013, ГОСТ Р 8.563-2009 и т.д.)		
1.5	Составление договора на проведение организационно- экспертных работ		
1.6	Разработка, согласование и утверждение программы аккредитации		
2.	Определение соответствия метрологической службы организации предъявляемым требованиям		
2.1	Проверка наличия аттестованных метрологической службой Заявителя методик выполнения измерений, отчетов по соответствующим НИР, иных материалов по вопросам аттестации в заявленной области аккредитации		
2.2	Проверка наличия экспертных заключений по документам категорий, указанных в заявленной области аккредитации		
2.3	Проверка наличия оборудования (средств измерений, контроля, испытаний, эталонов), необходимого для проведения работ по аттестации МВИ в заявленной области		
2.4	Проверка наличия стандартов и других нормативных документов в области деятельности аккредитуемой организации		

1	2	3	4
2.5	Проверка наличия стандартов предприятий, регламентирующих деятельность метрологической службы в заявленной области аккредитации		
2.6	Проверка наличия достаточного по количеству и квалификации персонала, имеющего профессиональную подготовку и опыт работы не менее трех лет в заявленной области аккредитации		
2.7	Проверка наличия помещений для проведения метрологических работ по аттестации МВИ, соответствующих по площади, состоянию и условиям (температуре, влажности, освещенности, виброизоляции, снабжению водой, теплом, хладагентом и т.д.), санитарным нормам, требованиям выполнения измерений, поверки и калибровки		
2.8	Проверка технической компетенции сотрудников аккредитуемой организации, непосредственно участвующих в проведении аттестации МВИ и метрологической экспертизы документов: а) знание форм представления результатов измерений; б) знание характеристик погрешности измерений; в) знание способов оценки достоверности контроля параметров продукции		
3.	Заключение		
3.1	Оформление удостоверений экспертов по аттестации МВИ и проведения метрологической экспертизы документов (при необходимости)		
3.2	Оформление акта о проделанной работе по аккредитации и: - при положительных результатах аккредитации оформление «Аттестата аккредитации» и области аккредитации; - при отрицательных результатах выработка замечаний и предложений		
3.3	Работа с ВНИИМС Росстандарта		
3.4	Выдача «Аттестата аккредитации» и приложения, определяющего область аккредитации		

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ РАБОТ

8. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

8.1. Цели и задачи метрологического обеспечения испытательного оборудования

Решение задач повышения качества продукции и внедрение в промышленность передовых достижений науки и техники выявило необходимость систематизации организационных и технических основ испытаний в частности метрологического обеспечения испытательного оборудования с целью обеспечения требований воспроизводимости, достоверности, точности и сопоставимости результатов испытаний.

Испытания – это экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результат воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействия.

В общем случае это определение включает оценивание и (или) контроль. Следует отметить, что экспериментальное определение характеристик свойств объекта при испытаниях может проводиться простейшими органолептическими методами, посредством регистрации определённых событий (отказ, сбой, промах и п. т.) при испытании, а также путём использования измерений, анализов, диагностирования и т.д., т.е. с применением специальных технических средств.

В зависимости от целей испытаний характеристики объекта при испытаниях могут оцениваться (измеряться), либо контролироваться.

Другой особенностью испытаний является задание определённых условий испытаний (реальных или моделируемых), определяющих результат воздействия на объект испытаний.

Технической основой большинства видов испытаний является испытательное оборудование (ИО).

Испытательное оборудование – средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний.

К условиям испытаний относятся различные воздействующие факторы, которые обычно подразделяют на естественные и искусственно создаваемые. В свою очередь эти факторы подразделяют на внутренние и внешние в зависимости от их воздействия на объект ис-

пытаний и режимов его функционирования. Таким образом: *условия испытаний* – это фактор или совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях.

Как правило, условия испытаний контролируются встроенными в ИО или внешними средствами измерений. В ряде случаев условия испытаний и их поддержание в необходимых пределах обеспечиваются техническими характеристиками ИО с допустимыми отклонениями параметров. У такого ИО технические характеристики фактически являются метрологическими и требуют метрологического обеспечения.

Многообразие видов испытаний, в которых используется ИО, приведены в справочном приложении ГОСТ 16504-81. Систематизация видов испытаний по основным признакам приведена в таблице 16.

Таблица 16 – Систематизация видов испытаний по основным признакам

Признак вида испытаний	Вид испытаний
1	2
Условия и место проведения испытаний	Лабораторные
	Стендовые
	Полигонные
	Натурные
	Испытания с использованием моделей
Продолжительность испытаний	Эксплуатационные
	Нормальные
	Ускоренные
Вид воздействия	Сокращенные
	Механические
	Климатические
	Термические
	Радиационные
	Электрические
	Электромагнитные
	Магнитные
	Химические
	Биологические
Результат воздействия	Неразрушающие
	Разрушающие
	Испытания на стойкость
	Испытания на прочность
Определяемые характеристики объекта	Испытания на устойчивость
	Функциональные
	Испытания на надежность
	Испытания на безопасность
	Испытания на транспортабельность
	Граничные испытания
Технологические испытания	

Для проведения указанных разнообразных испытаний используется еще более обширная номенклатура ИО [9]. Например, только для испытаний на надежность и стойкость радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) применяется ИО до двадцати наименований, приведённых в таблице 17, требующие метрологического обеспечения.

Таблица 17 – Испытательное оборудование

№№ пп	Вид испытаний	Наименование испытательного оборудования
1.	Испытания на устойчивость к сейсмическому удару	Ударный сейсмический стенд
2.	Испытания на воздействие ударной волны	Ударная труба
3.	Испытания на устойчивость при воздействии качки и длительных наклонов	Установка крена и качки
4.	Испытания на стойкость при воздействии воздушного потока	Аэродинамическая труба
5.	Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления при авиатранспортировании	Термобарокамера, установленная на летательный аппарат
6.	Испытания на воздействие атмосферных выпадаемых осадков (дождя)	Камера дождя
7.	Испытания на воздействие плесневых грибов	Камера тепла, влаги и грибообразования
8.	Испытания на воздействие солнечного излучения	Климатическая камера
9.	Испытания на динамическое и статическое воздействие песка и пыли	Камера песка и пыли
10.	Испытания на воздействие соляного тумана	Камера соляного тумана
11.	Испытания на стойкость к воздействию спецсредств	Комплект оборудования по ГОСТ «Мороз-7»
12.	Испытания на стойкость к воздействию коррозионноактивных агентов атмосферы	Универсальная климатическая камера
13.	Испытания на стойкость к воздействию ЭМИ	Имитатор ЭМИ
14.	Испытания на стойкость к воздействию гамма-импульса	Импульсный электронный ускоритель
15.	Испытания на стойкость к воздействию нейтронного импульса	Импульсный ядерный реактор
16.	Испытания на стойкость к воздействию гамма-нейтронного излучения	Линейный электронный ускоритель
17.	Испытания на стойкость при воздействии линейного ускорения	Центрифуга
18.	Испытания на воздействие повышенной (100%) влажности	Климатическая камера
19.	Климатические испытания ПТТ мобильных ИИС*	Большая климатическая камера
20.	Вибрационные испытания ПТТ мобильных ИИС	Контрольно-испытательная калибровочная трасса

Примечание: *ИИС – информационно-измерительные системы.

Под метрологическим обеспечением испытательного оборудования понимается комплекс мероприятий по установлению и применению научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения требуемых точности, достоверности, воспроизводимости, сопоставимости и своевременности проведения испытаний.

Целью метрологического обеспечения ИО является получение объективной информации о параметрах и характеристиках ИО, подвергаемых аттестации, путём обеспечения единства и точности измерений, воспроизведения и поддержания с требуемой точностью заданных условий испытаний.

Цель метрологического обеспечения ИО достигается решением следующих задач:

- определение номенклатуры параметров ИО, характеризующих условия испытаний, пределов их изменения и норм точности;
- выбор методов и средств измерений для метрологического обслуживания ИО;
- определение номенклатуры воздействующих факторов и испытательных режимов, точностных характеристик ИО;
- разработка и аттестация МВИ с использованием ИО;
- проведение метрологической экспертизы методик аттестации ИО;
- разработка программ и методик первичной и периодической аттестации ИО;
- поверка средств измерений и проведение аттестации ИО;
- определение периодичности аттестации ИО;
- метрологическая подготовка персонала испытательной организации.

Объектами метрологического обеспечения ИО являются:

- образцы ИО, их составные части и эксплуатационная документация на это оборудование;
- средства измерений и техническая документация на них;
- условия проведения испытаний, обеспечиваемые ИО;
- методики выполнения измерений с использованием ИО;
- методики аттестации ИО;
- персонал испытательной организации.

Одно из основных составляющих метрологического обеспечения эксплуатации является метрологическое обслуживание ИО. *Под метрологическим обслуживанием ИО* понимается комплекс мероприятий, обеспечивающий полноту и заданную точность контроля, регулировку параметров ИО с помощью средств измерений согласно действующей нормативной документации.

Метрологическое обслуживание ИО является составной частью технического обслуживания и решает следующие задачи:

- предупреждение преждевременного износа, выработки технического ресурса и ухода параметров ИО за пределы установленных норм;
- выявление и устранение неисправностей и причин их возникновения;
- доведение параметров и характеристик до норм, указанных в эксплуатационной документации.

Метрологическое обслуживание ИО, как правило, выполняется с периодичностью соответствующего технического обслуживания, указанной в эксплуатационной документации.

При подготовке и реализации метрологического обслуживания ИО проводится следующие организационно-технические мероприятия:

- разработка планирующей документации;
- организация взаимодействия между подразделениями при выполнении операций по измерению параметров;
- комплектование рабочих мест исправными приборами и соответствующей документацией;
- создание обменного фонда средств измерений и подготовка их к применению;
- организация метрологической подготовки персонала, выполняющего измерения и контроль параметров ИО;
- проведение измерений параметров при метрологическом обслуживании ИО;
- анализ и документальное оформление результатов измерений параметров ИО;
- контроль правильности и полноты измерений параметров.

Одной из задач метрологического обеспечения эксплуатации ИО является своевременная поверка или калибровка применяемых средств измерений. Важно отметить, что средства измерений, применяемые в сфере государственного метрологического контроля и надзора, подлежат процедуре обязательной поверки. Измерительные

приборы, применяемые в неуказанной сферы, могут подвергаться калибровке. Поверка и калибровка средств измерений в составе ИО, или применяемых при обслуживании, является важнейшим гарантом обеспечения воспроизводимости требуемых условий испытаний. Поверяться средства измерений могут как на месте установки ИО, так и путём их доставки в поверочные лаборатории.

Организациям, эксплуатирующим ИО, необходимо своевременно планировать периодическую поверку (калибровку) применяемых приборов. При этом следует учесть, что периодическая поверка (калибровка) средств измерений должна быть осуществлена до проведения периодической аттестации ИО.

По вопросам метрологического обеспечения ИО относится и метрологическая подготовка персонала, эксплуатирующего измерительную технику. К работе со средствами измерений допускаются лица, прошедшие специальную подготовку и имеющие навыки работы с приборами. Порядок допуска персонала к работе с использованием средств измерений должен быть строго определён в каждой испытательной лаборатории (подразделении).

Важнейшей из метрологических работ при эксплуатации является аттестация ИО. Под аттестацией ИО понимают определение нормированных точностных характеристик ИО, их соответствия требованиям нормативной документации и установления пригодности этого оборудования к эксплуатации.

Нормированные точностные характеристики ИО фактически являются метрологическими характеристиками и в определённой мере ИО можно рассматривать как средство измерительной техники.

8.2. Показатели точности и надёжности испытательного оборудования

Нормальное функционирование ИО характеризуется значениями некоторых его характеристик (параметров). Исходя из предназначения ИО, важнейшими параметрами этого оборудования являются его точностные характеристики.

Точность ИО есть степень приближения значений его параметров к их номинальным значениям. Точность ИО оценивается погрешностью воспроизведения условий испытаний от номинальных значений, т.е.

$$\Delta x = x_p - x_n, \quad (8.1)$$

где x_n – нормированное номинальное значение параметра, обеспечиваемое данным ИО; x_p – реальное (измеренное) значение параметра данного ИО.

Таким образом, точность функционирования количественно можно охарактеризовать отклонениями величин параметров ИО от их номинальных значений.

Определённую по этой формуле (8.1) погрешность называют абсолютной погрешностью и выражают в единицах параметра x .

Однако абсолютная погрешность Δx не всегда даёт представление о точности воспроизведения условий испытаний как о качестве ИО. Например, воспроизведение температуры с абсолютной погрешностью 10°C для имитации нагрева ($1\,000^\circ\text{C}$) оболочки космического аппарата при спуске на Землю можно признать весьма точным, а для воспроизведения нормальных температурных условий (20°C) поверки средств измерений является грубым. Поэтому точность ИО часто характеризуют относительной погрешностью воспроизведения δ – отношением абсолютной погрешности Δx к номинальному значению параметра

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_n}. \quad (8.2)$$

Относительную погрешность выражают в безразмерных величинах или в процентах.

В последнем случае относительная погрешность определяется формулой

$$\delta = \frac{100 * \Delta x}{x_n} \% . \quad (8.3)$$

Точностные характеристики ИО в нормативных документах задаются пределами допускаемых погрешностей, а также нормальными условиями и допускаемыми отклонениями от нормальных значений всех влияющих величин.

Предел допускаемой абсолютной погрешности Δx_δ может быть выражен одним значением $\Delta x_\delta = \pm a$ или в виде линейной зависимости:

$$\Delta x_\delta = \pm (a \pm b x_n), \quad (8.4)$$

где x_n – номинальное значение параметра воспроизведения;
 a и b – постоянные величины.

Иногда задаются пределы (Δx_δ^e – верхний, Δx_δ^h – нижний) допускаемой погрешности.

Предел допускаемой относительной погрешности выражается одной из следующих формул:

$$\delta_\delta = \frac{100 \square \Delta x}{x_n} = \pm c,$$

$$\delta_\delta = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \quad (8.5)$$

где x_k – конечное значение диапазона воспроизведения условий испытаний, обеспечиваемое ИО; x – установленное (заданное) значение параметра из диапазона воспроизведения; c и d – относительные постоянные величины.

В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной погрешности ИО устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

Технические характеристики ИО в эксплуатационной документации нормируются допустимыми значениями (допуском) воспроизведения условий испытаний. Например, значениями верхней границы поля допуска x_n^e и x_n^h – нижней границы поля допуска, т.е. номинальное значение параметра x_n находится в пределах ($x_n^h < x_n < x_n^e$).

Допуск – это такие установленные границы для значений параметров (погрешностей) оборудования, при которых ИО способно выполнять заданные функции, сохраняя свои нормированные характеристики при определённых условиях.

Согласно (8.1), допуск на параметр связан с допуском на погрешность Δx . Так, при оценке исправности ИО поле допуска на па-

параметр $(x_n^H < x_n < x_n^6)$ соответствует допуску на погрешность $(\Delta x_0^H < \Delta x < \Delta x_0^6)$, где $\Delta x_0^H = x_n^H - x_n$, $\Delta x_0^6 = x_n^6 - x_n$.

Рассматривая допуски на ИО, необходимо прежде всего однозначно сформулировать понятие отказ. В данном случае ИО можно рассматривать как техническое средство, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее физическую величину, т.е. как средство измерений. При этом выход значения параметра или погрешности воспроизведения условий испытаний за границы допускаемых пределов следует классифицировать как отказ ИО.

По характеру отказы подразделяют на внезапные и постепенные. По способу обнаружения отказы делятся на явные и скрытые.

При периодической аттестации ИО, как правило, осуществляется измерительный контроль параметров, в результате которого определяется нахождение параметров или погрешностей в границах поля допуска или выход из поля допуска.

Наиболее часто при изучении погрешностей Δx встречается нормальное распределение, дифференциальная функция плотности которого выражается уравнением:

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma_{\Delta x} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x - m_{\Delta x})^2}{2\sigma_{\Delta x}^2}}, \quad (8.6)$$

где $m_{\Delta x}$ – математическое ожидание погрешности Δx ; $\sigma_{\Delta x}$ – среднее квадратическое отклонение случайной величины Δx .

Если случайная величина Δx подчинена нормальному закону, то вероятность нахождения её значения в поле допуска, т.е. в данном случае вероятность безотказной работы, определяется по формуле

$$P(\Delta x_0^H < \Delta x < \Delta x_0^6) = \int_{\Delta x_0^H}^{\Delta x_0^6} f(\Delta x) d\Delta x = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{\Delta x_0^6 - m_{\Delta x}}{\sigma_{\Delta x} \sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{\Delta x_0^H - m_{\Delta x}}{\sigma_{\Delta x} \sqrt{2}}\right) \right], \quad (8.7)$$

где Φ – функция Лапласа.

При эксплуатации ИО значения его характеристик под воздействием различных факторов (старения, износа и т.д.) изменяется, и в общем случае этот процесс можно представить некоторой случайной функцией времени $x(t)$.

Момент достижения значения $x(t)$ границы допуска является временем (τ) наступления отказа (рис. 19) наступление отказа определяется надежностью ИО.

При определении надежности вероятностными методами случайной величиной считают время τ до появления отказа. Закон распределения этой случайной величины называют функцией ненадежности

$$F(t) = p\{\tau < t\} . \quad (8.8)$$

Она характеризует вероятность отказа оборудования на интервале $(0, t)$.

Дифференциальной формой закона распределения наработки до отказа является плотность распределения наработки до отказа

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} . \quad (8.9)$$

Наряду с функцией ненадежности используют функцию надежности $p(t)$

$$p(t) = 1 - F(t) . \quad (8.10)$$

Функцию надежности часто называют вероятностью безотказной работы объекта в течение наработки $(0, t)$.

Плотность $f(t)$ является неотрицательной функцией и площадь под функцией равна единице

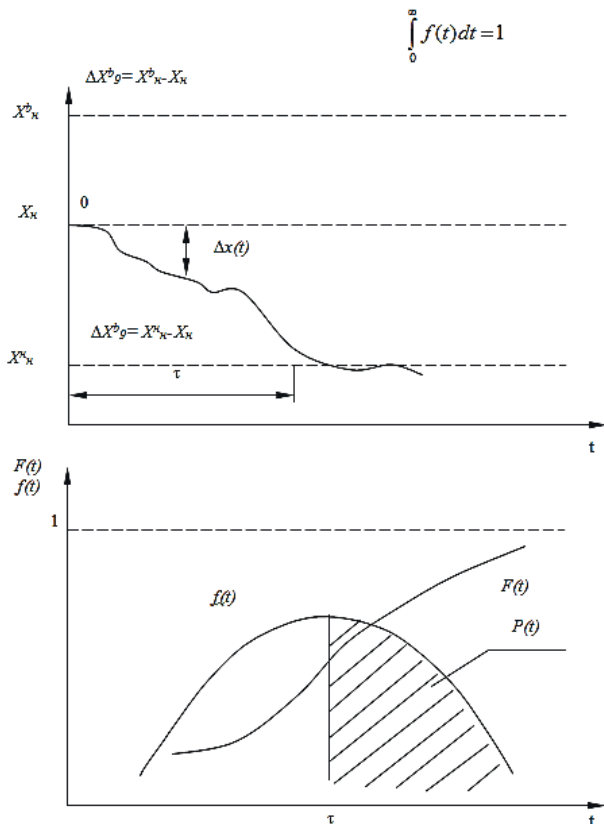


Рисунок 19 – График изменения значений параметра $x(t)$ и функций $F(t)$, $f(t)$

Вероятность безотказной работы и функция ненадежности связаны с плотностью распределения наработки на отказ соотношением

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad . \quad (8.11)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad . \quad (8.12)$$

При задании показателей надежности ИО наиболее часто используют среднюю наработку до отказа T_o (среднее время безотказной работы).

Согласно определению математического ожидания непрерывной случайной функции

$$T_o = M[\tau] = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} p(t) dt . \quad (8.13)$$

Таким образом, средняя наработка до отказа численно определяется площадью под кривой функции надежности $p(t)$.

При показательном законе вероятности безотказной работы

$$p(t) = e^{-\lambda t} . \quad (8.14)$$

где λ – интенсивность отказов, характеризуемая количеством отказов на интервале времени;

и при $\lambda = \text{const}$ средняя наработка до отказа равна обратной величине интенсивности отказов

$$T_o = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} . \quad (8.15)$$

В нормативных документах, в частности в технических условиях (ТУ) на ИО, согласно ГОСТ 2.114-95 «ЕСКД. Технические условия», указываются показатели надежности.

В качестве показателей безотказности у ИО указывают среднюю наработку на отказ T_o .

T_o – это отношение наработки восстанавливаемого объекта за некоторый период времени к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

Средняя наработка на отказ означает наработку восстанавливаемого объекта, приходящуюся в среднем на один отказ, в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определённой продолжительности эксплуатации.

Этим термином обычно называют среднюю наработку до отказа и среднюю наработку между отказами. Для совпадения этих понятий необходимо, чтобы после каждого отказа оборудование восстанавливалось до первоначального состояния.

Средняя наработка на отказ статистически определяется отношением суммарной наработки восстанавливаемых объектов к суммарному числу отказов этих объектов.

Для плана испытаний $[N, M, r]$

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{Nr}, \quad (8.16)$$

где N – число испытываемых объектов; t_i – момент r -го отказа i -го объекта.

Для обширного класса ИО в качестве показателя надежности указывается вероятность безотказной работы $p(\tau)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки τ отказа объекта не возникнет.

Этот показатель надежности чаще применяют для невозстанавливаемого ИО.

Для сложного восстанавливаемого (ремонтируемого) ИО используют комплексные показатели надежности:

K_2 – коэффициент готовности оборудования;

K_m – коэффициент технического использования;

K_2 – это вероятность нахождения ИО в работоспособном состоянии в любой момент времени (кроме периодов планового технического обслуживания и планового ремонта).

K_2 можно определить аналитически по формуле

$$K_2 = \frac{T_o}{T_6 + T_o}, \quad (8.17)$$

где T_o – наработка ИО на отказ; T_6 – среднее время восстановления.

K_m представляет собой отношение математического ожидания времени пребывания ИО в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации T_3 к сумме математических ожиданий времени пребывания оборудования в работоспособном состоянии T_3 , времени технического обслуживания T_{mo} и времени ремонта за период эксплуатации $T_{рем}$.

K_m определяется по формуле

$$K_m = \frac{T_3}{T_3 + T_{рем} + T_{mo}}. \quad (8.18)$$

При нормировании значений показателей надежности в документации ИО регламентируются конкретные условия определения и контроля этих показателей.

Исследование закономерности изменения во времени точностных характеристик ИО обычно основывается на применении математического аппарата теории случайных функций.

Наиболее простой моделью изменения основной погрешности ИО во времени является модель линейной случайной функции вида

$$\Delta x(t) = A_{oi} + B_i t, \quad (8.19)$$

где A_{oi} – начальная погрешность и B_i – скорость дрейфа погрешности.

Величины A_{oi} и B_i в общем случае являются случайными величинами.

Начальная погрешность A_{oi} отражает распределение погрешности в начальный момент времени после выпуска ИО с завода-изготовителя по i -му параметру.

Величина B_i отражает характер изменения погрешности во времени. Обработка статистических данных по результатам периодической аттестации ИО показывает, что случайные величины A_{oi} и B_i при первичной аттестации распределены по нормальному закону. После нескольких лет эксплуатации распределение случайной величины A_{oi} приближается к равномерному.

Значения параметров A_{oi} и B_i обычно рассчитываются при проектировании ИО и уточняются по результатам измерительного контроля при эксплуатации оборудования.

Приведённая модель изменения во времени точностных характеристик позволяет спрогнозировать достижение кривой $\Delta x(t)$ границ поля допуска. Существенным шагом вперед является модель нестационарного монотонного процесса изменения во времени текущего значения погрешности ИО.

Проведённые исследования [10] интегральных функций распределения для равномерного, нормального, экспоненциального законов показали, что с доверительной вероятностью $p = 0,9$ динамика погрешности определяется моделью

$$\Delta x(t)_{0,9} = m_{\Delta x}(t) + 1,64\sigma_{\Delta x}(t), \quad (8.20)$$

где $m_{\Delta x}(t)$ – математическое ожидание случайной функции $\Delta x(t)$, которая при каждом значении аргумента t равна математическому ожиданию соответствующего сечения случайной функции, т.е. $m(t)$ – неслучайная функция; $\sigma_{\Delta x}(t)$ – среднее квадратическое отклонение случайной функции $\Delta x(t)$, неслучайная функция, значение которой для каждого t равно среднему квадратическому отклонению сечений случайной функции.

При достижении кривой $\Delta x(t)$ допустимого предела Δ_0 у 5% ИО наступает скрытый отказ.

В статистическом режиме, когда параметры закона распределения практически не изменяются на интервале наблюдения, погрешность $\Delta x(t)$ вне зависимости от вида закона распределения с доверительной вероятностью $p = 0,9$ не превышает значения $\Delta_{0,9} = 1,64\sigma_{\Delta x}$.

Это однозначное соотношение допуска со средним квадратическим отклонением широко используется в метрологической практике при аттестации ИО и методике выполнения измерений.

Погрешность $\Delta x(t)$ как случай функции времени наиболее часто записывают в виде одномерной функции плотности распределения $f(\Delta x, t)$, которая характеризует распределение случайной функции $\Delta x(t)$ в любой произвольный момент времени.

При анализе погрешностей в большинстве случаев функцию $f(\Delta x, t)$ представляют в форме нормального закона распределения в сечениях времени t :

$$f(\Delta x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta x}(t)} \exp\left\{-\frac{[\Delta x - m_{\Delta x}(t)]^2}{2\sigma_{\Delta x}^2(t)}\right\}, \quad (8.21)$$

где $m_{\Delta x}(t)$ – математическое ожидание и дисперсия $\sigma_{\Delta x}^2(t)$ являются детерминированными функциями времени.

Зная значения функций $m_{\Delta x}(t)$ и $\sigma_{\Delta x}(t)$ и подставляя их в приведенную формулу (8.21), можно перейти к распределению $f(\Delta x)$. По выражению (8.7) при известных пределах Δx_0^g и Δx_0^h можно определить вероятность попадания значения погрешности в заданный интервал, т.е. определить вероятность безотказной работы ИО по контролируемому параметру в момент t_k .

В настоящее время имеется большое количество работ, где используются многомерные характеристики случайных функций $\Delta x(t)$, практическое их применение связано с математическими трудностями. Поэтому рассмотрение этих подходов выходит за объём данного учебного пособия.

8.3. Выбор средств измерений для аттестации испытательного оборудования

Правильный выбор средств измерений является базовым условием получения достоверной измерительной информации. Это обусловлено тем, что средства измерений являются технической основой при решении любой измерительной задачи. Основное внимание при выборе средств измерений уделяют обеспечению необходимой точности измерений в необходимом диапазоне изменения параметров объекта измерений. Одновременно учитывают и условия, в которых планируется использовать средства измерений, а также необходимую продолжительность.

При анализе условий, в которых будут проводиться измерения, определяются:

- уровни механических воздействий на приборы (вибрации, удары, линейные и угловые ускорения и т.п.) и стойкость средств измерений к ним;
- значения факторов окружающей среды (температуры, влажности, атмосферного давления) и возможность применения прибора в этих условиях;
- наличие сильных магнитных и электрических полей и защита от них у выбираемого средства измерений.

При решении простых измерительных задач, заключающихся в определении значений параметров несложных объектов, вопросы выбора и применения средств измерений решают, как правило, на основе практического опыта. При этом руководствуются простыми принципами, удовлетворяющими следующим условиям:

- средства измерений должны обеспечивать измерение параметров объекта с необходимой точностью в заданном диапазоне значений измеряемого параметра, с необходимым быстродействием, в определённых условиях окружающей среды;

- средства измерений должны быть приемлемыми по стоимости, массогабаритным и другим характеристикам.

Занижение точности средств измерений вызывает возрастание ущерба от снижения достоверности получения измерительной информации и снижения по степенному закону качества испытываемой продукции. В свою очередь завышение точности приводит к возрастанию их стоимости, сложности конструкции приборов, резкому увеличению затрат на их эксплуатацию.

В связи с усложнением ИО, увеличением важности результатов испытаний продукции, возросли ответственность решений, принимаемых на основе измерительной информации, и цена принимаемых решений.

Вследствие этого большую значимость приобрел правильный выбор средств измерений для измерительного контроля технических параметров ИО.

В сложившейся метрологической практике первоначально определяют типы средств измерений, пригодные по своему функциональному назначению, диапазонам измеряемых величин, стойкости к воздействующим факторам, массогабаритным характеристикам для решения измерительных задач по аттестации ИО.

После того как выбраны типы приборов, пригодные для решения измерительных задач, необходимо правильно оценить, какой из них обладает наименьшей избыточностью по точностным характеристикам. Выбор средства измерений, не имеющего такой избыточности, позволяет, как правило, обеспечить меньшие затраты на измерения и эксплуатацию этих средств.

Различные способы выбора средств измерений по точности основаны на рассмотрении двух ситуаций их использования:

- для измерения параметров;
- для измерительного контроля параметров.

В первом случае задача сводится к выбору такого средства измерений, с помощью которого обеспечивается значение предела суммарной (результатирующей) погрешности измерения параметра Δ_{Σ} , не превышающего требуемое Δ_{TP} :

$$\Delta_{\Sigma} \leq \Delta_{TP} . \quad (8.22)$$

Во втором случае выбор средства измерений производится из условия, что вероятности ложного α_{01} и (или) необнаруженного отказов β_{01} контролируемого параметра не должны превышать допустимых значений:

$$\begin{aligned} \alpha_{01} &\leq \alpha_{01}^D \\ \beta_{01} &\leq \beta_{01}^D \end{aligned} \quad (8.23)$$

где $\alpha_{01}^D, \beta_{01}^D$ – допустимые значения условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов.

Условные вероятности α_{01} и β_{01} , погрешность измерений и допуск на контролируемый параметр связаны следующим образом:

$$\alpha_{01} = \frac{1}{\int_{A_H}^{A_B} f(x) dx} \int_{A_H}^{A_B} f(x) \left(\int_{-\infty}^{A_H + \varepsilon - x} f(y) dy + \int_{A_B - \varepsilon - x}^{\infty} f(y) dy \right) dx, \quad (8.24)$$

$$\beta_{01} = \frac{1}{\int_{-\infty}^{A_H} f(x) dx + \int_{A_B}^{\infty} f(x) dx} \left(\int_{-\infty}^{A_H} f(x) dx \int_{A_H + \varepsilon - x}^{A_B - \varepsilon - x} f(y) dy + \int_{A_B}^{\infty} f(x) dx \int_{A_H + \varepsilon - x}^{A_B - \varepsilon - x} f(y) dy \right), \quad (8.25)$$

где A_H, A_B – соответственно нижняя и верхняя границы поля допуска контролируемого параметра; x – действительное значение контролируемого параметра (случайная величина при измерениях на различных объектах вооружения в разные моменты времени); $f(x)$ – плотность вероятности распределения значений контролируемого параметра; $f(y)$ – плотность вероятности распределения значений погрешности измерений; y – значение погрешности измерений; ε – величина сужения (расширения) поля допуска (контрольного допуска) относительно допуска на значения контролируемого параметра; это расширение (сужение) используется для перераспределения ошибок контроля (например, для уменьшения α_{01} и одновременно увеличения β_{01} и наоборот).

Следовательно, задаваясь допускаемыми значениями условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов, можно установить

требования к погрешностям измерений параметров и на этой основе выбирать приемлемые по точности средства измерений.

Исходными данными, необходимыми для выбора средств измерений по точности, являются:

- состав измеряемых и контролируемых параметров образца ИО;
- значения допусков на отклонения контролируемых параметров и допустимые значения суммарной погрешности определения значений измеряемых параметров;
- допускаемые значения вероятностей ложного и необнаруженного отказов для каждого из контролируемых параметров и значения доверительных вероятностей P_3 для измеряемых параметров;
- законы распределения отклонений контролируемых параметров от своих номинальных значений.

При выборе прибора для контроля параметров надо рассчитать допускаемое значение суммарной погрешности измерений

$$\Delta_{\text{доп}} = |\delta_H| R . \quad (8.26)$$

где $|\delta_H|$ – абсолютное значение ширины поля допуска на результат измерения контролируемого параметра; $|\delta_H| = |A_B - A_H - 2\varepsilon|$; R – допускаемое соотношение между погрешностью измерений и допускаемым отклонением результата измерения контролируемого параметра.

Значение R определяется раздельно по заданным допускаемым значениям условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов с учётом погрешности средства измерений и значений контролируемого параметра.

На практике не всегда известны исходные данные, необходимые для решения задачи выбора средств измерения по точности, как правило, отсутствует информация о законах распределения измеряемых параметров и погрешности измерений, а имеются лишь сведения о ширине поля допуска на измеряемый параметр. В таких случаях средства измерений выбирают по коэффициенту точности K_T , характеризующему отношение ширины поля допуска на измеряемый параметр δ_H к пределу суммарной погрешности измерений

$$K_T = \frac{\delta_H}{\Delta_\Sigma} .$$

Выбирают такое средство измерений, при применении которого обеспечивается значение коэффициента точности больше требуемого. В зависимости от важности контролируемого параметра требуемое значение K_T выбирается в пределах 2...5.

Если средство измерений предназначено для использования в сфере распространения государственного метрологического контроля и надзора, то выбранное средство измерений должно быть утверждённого типа и внесено в государственный реестр средств измерений.

С учётом изложенного подхода к выбору средств измерений осуществляется оснащение типовых измерительных лабораторий (ИЛ) для проведения аттестации ИО. Например, для испытаний на электромагнитную совместимость, на стойкость и транспортабельность радиоизмерительных приборов при аттестации ИО применяются средства измерений, приведённые в таблицах 18–20.

Таблица 18 – Средства измерений, применяемые при аттестации испытательного оборудования

Вид испытательного оборудования	Технические (в т.ч. метрологические) характеристики	Средства измерений (наименование, тип)	Диапазон измерений	Погрешность измерений, класс точности
1	2	3	4	5
Термо-камеры, термогигрокамеры, термобарокамеры	Объем рабочих камер (3...830) м ³	Термометр лабораторный ТЛ-4	(-30...+360)°С	± 0,2 °С
	Диапазон воспроизводимых температур (-70...+200)°С	Термометры типа ТСП 8040; 8041; 8042; 8043; 8044; 8045	(-200...+500) °С	А, В
	Время выхода на режим (60...150) мин.	Психрометр аспирационный М-34	(10...100)%	± 2%
	Точность поддержания температуры ± 2°С	Измеритель влажности КМ140-501-ОМ4	(20...90)%	± 6%
Диапазон воспроизводимых давлений (190...5) мм рт.ст.	Барометр-анероид М110	(5...790) мм рт.ст.	± 1,5 мм рт.ст.	1,5
Точность поддержания давления (3...5) %	Мановакуумметр МП	(-0,1-0-2,4) МПа		
Диапазон воспроизводимой влажности (10...100)%				

Вибрационные установки	<p>Диапазон частот ($5 \dots 5 \cdot 10^3$) Гц Амплитуда виброперемещения (2...3) мм. Масса полезной нагрузки до 50 кг.</p>	<p>Измеритель вибраций ИВ-Д-ПФ-С Виброметр ВШВ-003М Осциллограф С8-18 Анализатор спектра СК4-97</p>	<p>(20...5000) Гц, (0...1000) мм/с² (2...20000) Гц, (1..3) мм. 0,05 мкс/дел... 1с/дел. (10...1,3*10⁸) Гц</p>	<p>± 6% ± 10% ± 4% ± (0,3..0,7) дБ</p>
Ударные стелды	<p>Ударное ускорение (10...500)g. Длительность действия (0,3...10*10⁻³) с. Число ударов в минуту (10...100) Масса полезной нагрузки до 150 кг.</p>	<p>Машина силоизмерительная ОСМ-2-100 Акселерометр ударный АВС 034-01 Динамометр ДОРМ-3-0,1; Динамометр ДОРМ-3-12 Динамометр общего назначения ДПУ-0,01-2 Динамометр ДПУ-500-2 Осциллограф запоминающий С8-23</p>	<p>До 1000 кН (50...1500) м/с² (0...100) кгс (0...12000) кгс (0,01...0,1) кН (5..50) кН (0..20) МГц</p>	<p>± 0,5% ± 10% Р.3 Р.3 ± 2% ± 0,5% ± 3%</p>
Оборудование для испытаний на электромагнитную совместимость	<p>Диапазон частот (0,1..37,5*10⁹) Гц. Пиковое значение напряжения (10⁻⁶...10⁶) В. Длительность импульса (10...50) мкс. Длительность фронта импульса (1...8) мкс. Погрешность коэффициента калибровки не более 1 дБ.</p>	<p>Аттенуатор типа Д1-13 Вольтметр типа В7-40</p>	<p>(0...3*10⁻²) ГГц.</p>	<p>(0...11) дБ ступенями через 10 дБ напряжение постоянного тока 10 мкВ...1000 В, 1...30 кВ (с делителем) Среднее квадратическое значение напряжения</p>

			<p>20...100 кГц</p> <p>50 кГц ...10 МГц</p> <p>50 кГц...10 МГц</p> <p>50..1000 МГц</p>	<p>переменного тока 2мВ..200 В.</p> <p>500..1000 В (с делителем)</p> <p>0,1...15 В (с ВЧ пробником)</p> <p>0,1...3 В</p> <p>Сила постоянного тока 0,01 мкА... 2А</p> <p>До 10 А с шунтом</p> <p>Среднее квадратическое значение силы переменного тока 2 мкА ... 0,2 А</p> <p>0,2 А.. 2 А</p> <p>до 10 А с шунтом</p> <p>Активное сопротивление 0,01 Ом..20 МОм</p> <p>U: на пределах 20 мВ</p>
		Вольтметр типа В7-46	<p>40 Гц...20 кГц.</p> <p>40 Гц...2 кГц.</p> <p>40 Гц...2 кГц.</p>	

				200 мВ, 2, 20 В
			20 Гц .. 1 МГц 20 Гц .. 100 кГц	200 В
			40 Гц ... 20 кГц	1000 В
			40 Гц ... 10 кГц 40 Гц ... 2 кГц	-
			0,01 ... 30 МГц	200 мВ, 2, 20В, 700 В I: на пределах 20, 200 мкА, 2, 20, 200, 2000 мА, 10 А (с внешним шунтом)
			(8,15... 12,05) ГГц	На диапазонах с пределами 200 мкА, 2, 20, 200 мА
		Вольтметр селективный типа В6-15	(12,05... 17,85) ГГц	2000 мА
		Генератор сигналов типа Г4-197	(1*10 ⁻⁴ ... 1,28) ГГц	10 А (с внешним шунтом)
		Генератор сигналов типа Г4-98	(1*10 ⁻⁴ ... 2,56) ГГц	Сопротивление постоянному току на пределах 20, 200 Ом; 2, 20, 200, 2000 кОм; 20 МОм; 20, 200 МОм по двухпроводной схеме
				0,1 мкВ .. 1 В

		Генератор сигналов типа Г4-201	10 Гц.. 37,5 Гц	
		Генератор сигналов типа Г4-201/1		$6 \cdot 10^{-2}$ Вт
		Электронно- счетный частото- мер типа ЧЗ-71	10^{-2} ..1,6 Гц	$2 \cdot 10^{-2}$ Вт
		Электронно- счетный частото- мер типа ЧЗ-77	0,05 Гц ... 20 кГц	
		Анализатор спек- тра типа СК4-72	300 Гц ... 300 МГц	$5,62 \cdot 10^{-8}$... 2 В
		Анализатор спек- тра типа С4-74	(0...100) МГц	$5,62 \cdot 10^{-8}$... 1В
		Осциллограф типа С1-152		0,02 мВт...0,05 Вт
				0,05...1 В
				(2...15) мкВ
				(10^{-15} ... 10^{-12}) Вт/кГц
				50 нс/дел. ... 0,1 с/дел.

Таблица 19 – Характеристики средств измерений, применяемых при аттестации испытательного оборудования

Средства измерений	Диапазон частот	Диапазон измерений	Погрешность	
Осциллограф специальный типа С9-9	0..18 ГГц	10 мВ..1 В	$\pm \left(0,3 + \frac{0,8U_0}{U_x} + \frac{0,2}{U_x} \right)$	$\pm \left(0,2 + \frac{0,5D_P}{D_X} \right)$ при D_X от 5 нс до 100 мкс; $\pm \left(2 + \frac{0,4D_P}{D_X} + \frac{0,6}{D_X} \right)$ при D_X от 40 пс до 5 нс
Осциллограф специальный типа С9-10/1	Максимальная частота дискретизации 5 МГц	50 мВ ... 250 В	± 3	± 2 $\pm 0,5$ при работе с КОП или ЭВМ
Осциллограф специальный типа С9-18	50	1 мВ ... 100 В	$2 + 0,2 \times \left(\frac{U_K}{U_X} - 1 \right) + 0,12f_X$ $\pm (3..4)$	$2 + \frac{200}{t_X}$
Осциллограф запоминающий типа С8-23	0..20 МГц	$10^* 10^{-9} .. 2000$ с./дел.		

Таблица 20 – Средства измерений, применяемые при аттестации испытательного оборудования

Вид испытательного оборудования	Технические (в т.ч. метрологические) характеристики	Средства измерений (наименование, тип)	Диапазон измерений	Погрешность измерений, класс точности
1	2	3	4	5
		Антенна измерительная типа: П6-40 П6-40/1 П6-40/2 П6-40/3 П6-40/4 П6-40/5 П6-40/6 П6-40/7 Датчик тока (мишень) по приложению Б ГОСТ Р51317.4.2-99 Имитатор ИТС типа ИСШ-2М	(25,86...37,5) ГГц (17,44...25,86) ГГц (12,05...17,44) ГГц (8,24...12,05) ГГц (5,64...8,24) ГГц (3,94...5,64) ГГц (2,59...3,94) ГГц (1,5...2,59) ГГц (47...282) бод (23,5...141) Гц	± 1,0 дБ ± 1,0 дБ ± 1,0 дБ ± 1,0 дБ ± 1,5 дБ ± 1,5 дБ ± 1,5 дБ ± 1,5 дБ ± 3 Гц
Стенд опрокидывания для испытаний на статическую устойчивость	Угол наклона стола (-15...+55) уг.град. Погрешность установки $\Delta_{\phi} = \pm 1$ уг.град.	Квадрант - оптический типа К0-30 Угломер типа ЗУ-РИ	(-120...+120) уг.град. (0...360) уг.град	± 30 ± 1 уг.град

8.4. Аттестация испытательного оборудования

8.4.1. Порядок проведения аттестации испытательного оборудования

Основной целью аттестации ИО является получение объективной информации о возможности воспроизведения условий испытаний в пределах допускаемых отклонений и установление пригодности использования ИО в соответствии с его назначением.

Воспроизводимость условий испытаний определяется стабильностью точностных характеристик ИО, режимами устойчивой работы этого оборудования.

Обязательной аттестации ИО подлежит оборудование, в т.ч. физико-математические модели воздействий на объект испытаний, используемое при обязательной сертификации продукции, при испытаниях продукции на соответствие обязательным требованиям государственных стандартов и при производстве продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд.

Обязательной аттестации ИО подлежит оборудование, используемое для испытания объектов в сфере обороны и безопасности государства.

Для организации работ по аттестации ИО разрабатывается программа и методика её проведения. Программа и методика аттестации ИО, как правило, разрабатываются подразделением, проводящим испытания. При этом следует подчеркнуть, что программа и методика аттестации подлежат метрологической экспертизе на стадии, предшествующей её утверждению.

Метрологическая экспертиза методики аттестации – начальная составляющая работ по аттестации ИО.

Основными задачами метрологической экспертизы методики аттестации является оценка и (или) анализ:

- состава измеряемых (контролируемых) параметров;
- средств измерений, вспомогательных устройств, используемых в методике;
- возможности отклонения характеристик условий испытаний и диапазона измерительного контроля этих отклонений;
- правильности алгоритмов обработки измерительной информации и представления результатов измерений по методике аттестаций.

При вводе в эксплуатацию ИО должно подвергаться первичной аттестации. Аттестацию каждого ИО проводят в индивидуальном порядке. Как правило, число контролируемых параметров при проведении и первичной аттестации превышает их количество при периодической аттестации ИО. Это объясняется тем, что первичная аттестация проводится в начале жизненного цикла ИО, когда интенсивность отказов значительно превышает её значение на этапе основного периода эксплуатации. По этому естественно желание разработчика ме-

тодики аттестации ИО включить большее число параметров, подлежащих измерительному контролю.

Первичная аттестация ИО заключается в экспертизе проектной и эксплуатационной документации, экспериментальном определении нормированных точностных характеристик, их соответствия требованиям нормативной документации и подтверждении пригодности этого оборудования к эксплуатации.

Объём контролируемых параметров ИО, подлежащих определению (измерению) или контролю при первичной аттестации, выбирают из числа нормированных технических характеристик, установленных в технической документации и определяющих возможность воспроизведения условий испытаний в заданных диапазонах с допускаемыми отклонениями в течение установленного интервала времени.

Методика аттестации должна содержать необходимый минимум параметров, подлежащих измерительному контролю для решения вопроса о пригодности ИО к применению и обеспечивающих наибольшую производительность работ при аттестации при наименьших затратах.

Первичную аттестацию ИО проводит комиссия. Комиссию назначает руководитель предприятия (организации), проводящего испытания на данном ИО. Состав комиссии согласовывается с органом государственной метрологической службы, если их представители должны участвовать в работе комиссии.

В состав комиссии включают представителей:

- подразделения предприятия, проводящего испытания на данном ИО;
- метрологической службы предприятия, подразделение которого участвует в испытаниях;
- органов государственной метрологической службы (научных метрологических центров) при использовании ИО для испытаний продукции, поставляемой для государственных нужд.

Аттестацию ИО могут проводить организации, аккредитованные на право проведения такой работы.

На первичную аттестацию заявитель представляет ИО с технической документацией и техническими средствами, необходимыми для его нормального функционирования. Заявитель представляет следующие документы:

- эксплуатационную документацию на ИО;

- программу проведения аттестации ИО;
- методику первичной аттестации ИО;
- методику периодической аттестации ИО.

В случае когда аттестации подвергается импортное оборудование, эксплуатационные документы фирмы-изготовителя должны быть переведены на русский язык.

Программа аттестации – это организационно-методический документ, обязательный к выполнению, устанавливающий последовательность проводимых операций контроля и измерения параметров ИО, условия и место проведения измерений, обеспечение и отчетность по аттестации.

Программа метрологической аттестации ИО должна содержать:

- наименование ИО;
- цель аттестации ИО;
- указание места проведения аттестации и привлекаемые силы;
- указание средств измерений, которые будут использованы при проведении аттестации ИО;
- МВИ, которые будут использованы при выполнении работ по аттестации ИО;
- перечень работ, проводимых в ходе аттестации ИО с указанием исполнителей.

Методика аттестации ИО – это организационно-методический документ, устанавливающий совокупность операций и правил при аттестации, выполнение которых обеспечивает получение результатов определения показателей точности и воспроизводимости условий испытаний, установление пригодности этого оборудования к применению по назначению.

Методика аттестации, как правило, состоит из двух частей. Первая часть регламентирует экспертизу эксплуатационной и проектной документации, на основе которой выполнено и установлено ИО. Во второй части устанавливается совокупность операций и их последовательность при экспериментальном определении точностных характеристик ИО.

Проведение экспертизы документов предполагает решение следующих задач:

- контроль полноты представленных на экспертизу документов;
- анализ нормированных точностных характеристик ИО и условий их обеспечения;

- анализ средств измерений и контроль из состава аттестуемого ИО;
- анализ диапазона обеспечиваемых данным ИО условий испытаний;
- анализ диапазона воспроизведения (регулировки) условий испытаний у данного ИО;
- проверка соответствия эксплуатационных документов требованиям ГОСТ 2.601 – 95;
- анализ показателей надежности аттестуемого ИО.

Разработка методики аттестации ИО включает определение номенклатуры контролируемых параметров ИО при экспериментальных исследованиях, а также определение интервалов времени периодической аттестации.

Методика аттестации ИО должна содержать вводную часть и следующие разделы:

- требования к точности экспериментального определения нормированных метрологических характеристик ИО;
- метрологические характеристики (диапазоны, допустимые погрешности воспроизведения условий испытаний и т.п.) ИО;
- условия экспериментального определения характеристик ИО;
- средства измерений, вспомогательные устройства, материалы, растворы, применяемые при аттестации ИО;
- метод (МВИ) измерений при определении точностных характеристик ИО;
- требования безопасности, охраны окружающей среды;
- требования к квалификации операторов;
- перечень параметров, подлежащих измерительному контролю, включая число точностных характеристик, число контролируемых значений (измеряемых точек) в диапазоне воспроизведения условий испытаний;
- подготовка к выполнению экспериментальных исследований;
- выполнение экспериментального определения точностных характеристик ИО;
- обработка (вычисление) результатов экспериментальных исследований;
- определение интервала времени периодической аттестации;
- оформление результатов аттестации.

Допускается исключать, или объединять указанные разделы, или изменять их наименования, а также включать дополнительные разделы с учётом специфики аттестуемого ИО.

В раздел «Выполнение экспериментального определения точностных характеристик» рекомендуется включать перечень операций, подлежащих определению при измерительном контроле параметров ИО. Операции должны быть указаны в той последовательности, в которой наиболее целесообразно вести процесс измерений.

Раздел «Условия экспериментального определения характеристик ИО», как правило, содержит перечень влияющих величин, их номинальных значений, границы диапазонов возможных значений, а также другие характеристики влияющих величин. К числу влияющих величин относятся параметры сред, напряжение и частота тока питания, внутренние импедансы ИО и другие характеристики.

В процессе первичной аттестации устанавливают:

- возможность воспроизведения условий испытания в виде внешних воздействующих факторов, а также режимов функционирования объекта испытаний, установленных в документах на методики испытаний образцов продукции конкретных видов;

- диапазон возможных отклонений характеристик условий испытаний от нормированных значений;

- обеспечение безопасности и охраны окружающей среды;

- перечень характеристик ИО, включая число контролируемых значений в диапазоне воспроизведения условий испытаний, которые проверяют при периодической аттестации оборудования;

- методы, средства и периодичность аттестации.

Результаты аттестации оформляют протоколом, в котором указывается:

- состав комиссии с указанием фамилии, должности, наименование предприятия (организации);

- основные сведения об ИО (наименования, тип, заводской или инвентарный номера, завод-изготовитель);

- проверяемые характеристики ИО;

- условия проведения аттестации (температура, влажность, освещенность и т.д.);

- документы, используемые для аттестации (программа и методика аттестации, стандарты, технические условия, эксплуатационные документы и т.п.);

- характеристики средств измерений, используемых для проведения аттестации ИО (наименование, тип, заводской или инвентарный номера, завод-изготовитель, сведения о поверке).

Результаты аттестации, включающие в себя:

- комплектность и отсутствие повреждений;
- функционирование узлов и агрегатов;
- наличие действующих документов на методики поверки встроенных или входящих в комплект средств измерений;
- значения характеристик ИО, полученные при аттестации;
- заключение о соответствии ИО требованиям нормативных документов на ИО и на методики испытаний продукции конкретных видов, возможности использования ИО для их испытаний.

В рекомендациях комиссии должны содержаться:

- перечень нормированных характеристик, которые определяют при первичной аттестации ИО;
- периодичность периодической аттестации ИО в процессе его эксплуатации;
- дополнительные рекомендации (при необходимости).

При положительных результатах аттестации на основании протокола аттестации оформляется аттестат. Аттестат подписывает руководитель организации, проводившей аттестацию ИО (Заявителя или организации, аккредитованной на право аттестации ИО).

Отрицательные результаты аттестации ИО указывают в протоколе первичной аттестации.

В процессе эксплуатации ИО подвергают периодической аттестации в объёме, необходимом для подтверждения соответствия характеристик оборудования требованиям нормативных документов на методики испытаний и эксплуатационных документов и пригодности его к дальнейшему использованию.

Номенклатуру проверяемых параметров ИО и объём операций при его периодической аттестации устанавливают при разработке или при первичной аттестации оборудования, исходя из требований обеспечения безотказной работы межаттестационный период и точности воспроизведения условий испытаний конкретной продукции. Периодическую аттестацию ИО в процессе эксплуатации осуществляют сотрудники подразделения, за которым закреплено оборудование, допущенные установленным порядком к проведению этих работ, а также представители метрологической службы предприятия. Как и при

первичной аттестации, результаты периодической аттестации оформляются протоколом с отметкой в паспорте (формуляре) на ИО.

В случае сомнения обеспечения необходимых условий испытаний воспроизводимых ИО может быть проведена повторная аттестация ИО в объёме периодической аттестации.

После ремонта или модернизации ИО, а также после проведения работ с фундаментом, на котором оно установлено, или перемещения стационарного ИО проводят повторную аттестацию ИО в порядке, установленном для первичной аттестации.

Рекомендуемые правила оформления, а также примерное содержание программ и методик аттестации ИО приведены в Приложении А, Б, В, Г.

Содержание программы аттестации

Содержание разделов программы аттестации определяют в зависимости от вида аттестуемого ИО.

А.1. В разделе «Объект аттестации» указывают:

- полное наименование и обозначение ИО;
- комплектность ИО;
- перечень составных частей, замена которых в процессе аттестации предусмотрена документацией на ИО.

А.2. В разделе «Цель аттестации» указывают конкретные цели и задачи, которые должны быть достигнуты и решены в процессе аттестации.

А.3. В разделе «Общие положения» указывают:

- перечень документов, на основании которых проводят аттестации;
- место и продолжительность проведения аттестации;
- организации (предприятия), участвующие в аттестации;
- сведения о ранее проведенных аттестациях данного ИО;
- перечень представляемых на аттестации документов.

А.4. В разделе «Объем аттестации» указывают:

- перечень этапов аттестации, а также количественные и качественные характеристики, подлежащие оценке;
- последовательность проведения аттестации;
- требования по аттестации программных средств.

В типовых программах аттестации необходимо проводить типовой перечень проверок, подлежащих включению в программы аттестации конкретных ИО.

А.5. В разделе «Условия и порядок проведения аттестации» указывают:

- условия проведения аттестации [характеристика района (места) проведения аттестации, время года и суток, температура окружающей среды, температурный градиент, давление и влажность окружающей среды, ускорение и т.д.] с оценкой, при необходимости, степени их приближения к реальным условиям эксплуатации, заданным в эксплуатационных документах, методиках испытаний, дей-

ствующих НД, а также допустимые значения отклонений условий аттестации от заданных;

- условия начала и завершения отдельных этапов аттестации;
- имеющиеся ограничения в условиях проведения аттестации;
- условия перерыва (прекращения) аттестации;
- требования к техническому обслуживанию ИО в процессе аттестации и периодичность его проведения;
- меры, обеспечивающие безопасность и безаварийность проведения аттестации;
- порядок взаимодействия организаций (предприятий), участвующих в аттестации;
- требования к персоналу, проводящему аттестацию, и порядок его допуска к аттестации, при необходимости.

Меры, обеспечивающие безопасность и безаварийность проведения аттестации, нейтрализацию вредных воздействий, рекомендуется оформлять в виде подразделов «Требования по безопасности труда», в которых указывают основные требования обеспечения безопасности труда в соответствии с требованиями эксплуатационной документации, стандартов системы безопасности труда и других НД по технике безопасности.

А. 6. В разделе «Материально-техническое обеспечение аттестации» указывают конкретные виды материально-технического обеспечения с распределением задач и обязанностей подразделений, организаций (предприятий), участвующих в аттестации, по видам обеспечения, а также устанавливают сроки готовности материально-технического обеспечения.

В разделе могут быть выделены подразделы: материально-техническое, математическое, бытовое обеспечение, обеспечение скрытности и секретности, обеспечение документацией.

В зависимости от степени сложности ИО в обоснованных случаях данный раздел может быть представлен несколькими разделами по видам обеспечения аттестации или вынесен в приложении к программе аттестации.

А.7. В разделе «Метрологическое обеспечение аттестации» приводят перечень требований и мероприятий по метрологическому обеспечению с учетом требований установленных в ГОСТ Р 8.568-97, ГОСТ РВ 8.570-98, ГОСТ Р 8.563-2009 и других нормативных документах с распределением задач и ответственности организаций

(предприятий), участвующих в аттестации, за выполнение соответствующих мероприятий.

В качестве приложения к программе и методике аттестации ИО приводят перечень средств измерений и испытательного оборудования используемого при аттестации с указанием сведений об их поверке (аттестации) и утверждения типа СИ. Примерная форма перечня СИ и ИО приведена в приложении г.

А.8. В разделе «Отчётность» указывают:

- перечень отчетных документов, которые должны быть оформлены в процессе аттестации и по ее завершению, с указанием организаций и предприятий, разрабатывающих, согласующих и утверждающих их, и сроки оформления этих документов;
- перечень рассылки отчетной документации;
- порядок, место и сроки хранения первичных материалов аттестации.

К числу отчётных документов относятся протоколы аттестации испытательного оборудования, аттестат ИО.

А.9. В разделе «Приложение» указывают перечень методик аттестации, математических и комплексных моделей, применяемых для оценки характеристик испытательного оборудования.

А.10. Типовые программы аттестации вместо раздела «Объект аттестации» содержат вводную часть, которая не имеет заголовка и нумерации. Во вводной части указывают область распространения программы аттестации, особенности функционирования и испытаний данной группы ИО, возможные ограничения по применению типовой программы аттестации.

Содержание методики аттестации

Содержание разделов методики аттестации определяют в зависимости от вида ИО и проверяемой характеристики (свойства, показателя).

Б.1. В разделе «Объект аттестации» указывают наименование ИО, его индекс, состав, а также особенности его функционирования, существенные для применения методики.

Б.2. В разделе «Цель аттестации» указывают конечную цель проверки характеристики, сформулированную в наименовании методики.

Б.3. В разделе «Общие положения» приводят:

– определение проверяемой характеристики, если она не определена в стандарте или другом НД, регламентирующем терминологию;

– метод аттестации и обоснование его выбора;

– поясняющие сведения, относящиеся к объекту аттестации.

Б.4. В разделе «Оцениваемые характеристики и расчётные соотношения» приводят:

– перечень показателей, количественно выражающих оцениваемую характеристику;

– расчётные соотношения и формулы (математическая модель), по которым рассчитывают оцениваемые показатели, соотношения и формулы должны быть приведены в конечном виде (без выводов) с объяснением символов, обозначений и коэффициентов.

При наличии качественной характеристики указывают метод её оценки.

Б.5. В разделе «Условия и порядок проведения аттестации» указывают:

– условия проведения аттестации;

– продолжительность, периодичность, цикличность операций аттестации и последовательность воспроизведения внешних воздействий, формируемых ИО;

– требования по технике безопасности и квалификации обслуживающего персонала;

- особенности функционирования ИО и используемых при проведении аттестации средств, порядок их взаимодействия;
- объём регистрируемой информации и способы ее регистрации;
- формы и порядок учёта статистических данных, в т.ч. подробная развернутая форма записи данных;
- методы контроля ИО (внешний осмотр, проведение измерений и др.);
- последовательность выполнения операций при аттестации и проверках с указанием контрольных точек, способов и количества измерений, используемых средств измерений и описанием выполняемых регулировок, операций с переключателями, схем расположения и включения приборов.

Если в процессе аттестации предусматривается использование метода моделирования, то должны быть указаны принцип моделирования, порядок применения результатов моделирования, принцип и метод проверки совместимости результатов моделирования результатами натуральных экспериментов.

Б.6. В разделе «Обработка, анализ и оценка результатов аттестации» указывают:

- порядок применения статистических данных, накопленных до начала аттестации (при наличии);
- объём обрабатываемой информации;
- методы статистической обработки результатов аттестации, применяемые в методике;
- способы обработки информации с указанием их места в процессе обработки;
- требования к виду обработанной информации;
- требования к точности обработки информации;
- порядок и последовательность проведения анализа результатов, полученных на выходе системы обработки, а также экспресс-анализа;
- объём исходных данных, необходимых для оценки результатов аттестации;
- способ сравнения полученных данных с требованиями, заданными в программе аттестации;

– критерии, при выполнении которых аттестуемое ИО считают аттестованным;

– критерии достаточности работ по аттестации.

Б.7. В разделе «Материально-техническое обеспечение аттестации» для обеспечения выполнения конкретного пункта программы аттестации указывают:

– состав технических средств с указанием их наименований и обозначений;

– оборудование, необходимое для аттестации;

– перечень необходимой технической документации;

– перечень и количество материалов, в т.ч. расходных, необходимых для проведения аттестации;

– состав привлекаемых транспортных средств и, при необходимости, другие виды материально-технического обеспечения;

– порядок подготовки и использования материально-технических средств в процессе аттестации.

Б.8. В разделе «Метрологическое обеспечение аттестации» приводят перечень требований и мероприятий по метрологическому обеспечению с учетом установленных в ГОСТ Р 8.568-97, ГОСТ РВ 8.570-98, ГОСТ Р 8.563-2009 и других нормативных документах с распределением задач и ответственности организаций (предприятий), участвующих в аттестации, за выполнение соответствующих мероприятий.

Б.9 В разделе «Отчетность» приводят требования к объёму сведений, подлежащих отражению в протоколе аттестации по данному пункту программы аттестации.

Б.10. Типовые методики аттестации вместо раздела «Объект аттестации» содержат вводную часть, которая не имеет заголовка и нумерации. Во вводной части указывают область распространения методики аттестации, особенности функционирования данной группы ИО, возможные ограничения по применению методики аттестации.

Б.11. В случае оформления методики аттестации в виде единого документа «Программа и методика аттестации» в методике аттестации допускается исключать разделы, которые дублируют аналогичные разделы (пункты) программы аттестации.

Правила оформления программ и методик аттестации

В.1. Программы и методики аттестации выполняют машинописным способом и оформляют в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к текстовым конструкторским документам по ГОСТ 2.105-95, на листах формата А4 по ГОСТ 2.301-68 без рамки, основной надписи и дополнительных граф к ней.

В.2. Схемы, чертежи и таблицы выполняют на листах форматов, установленных ГОСТ 2.301-68.

В.3. Номера листов (страниц) проставляют в верхней части листа (над текстом).

В.4. Программы и методики аттестации оформляют в виде отдельных брошюр и книг. При этом порядок их компоновки должен быть следующим:

- обложка (переплет);
- титульный лист (первый лист документа);
- содержание;
- основной текст документа;
- приложение.

В.5. Обложку применяют в документах, имеющих объём до 50 листов. При объёме более 50 листов документы переплетают.

В.6. На обложке (переплете) указывают наименование организации, выпустившей документ, наименование и год выпуска документа.

В.7. Наименование документа выполняют крупным шрифтом и включают в него полное наименование, обозначение опытного (опытного ремонтного) образца изделия и вид документа.

В.8. В наименование типовой программы аттестации включают заголовок, дающий общее определение группы однотипных изделий, на которые разрабатывается документ, и подзаголовок, указывающий, что данная программа является типовой.

В.9. В наименовании типовой методики аттестации включают заголовок, дающий общее определение группы однотипных изделий, на которые разрабатывается документ, и подзаголовок, определяющий проверяемую характеристику и указывающий, что данная методика является типовой.

В.10. Подписи разработчиков программ и методик аттестации помещают на последнем листе основного текста документа. Визы должностных лиц, если они необходимы, помещают на поле подшивки этого листа.

В.11. При объёме документа более 200 листов или по решению разработчиков документа, независимо от его объёма, программы и методики могут быть составлены в двух или более частях (книгах). При этом в конце содержания первой части (книги) документа указывают распределение материала (разделов) по частям (книгам).

В.12. При разработке отдельных частей (книг) программ и методик аттестаций соисполнителями, по поручению разработчика документа, соисполнители подписывают последний лист этой части (книги).

Приложение Г
(рекомендуемое)

**Перечень средств измерений и испытательного оборудования,
используемого при аттестации**

Тип СИ (ИО)	Заводской №	№ свидетельства о поверке СИ, свидетельства об аттестации ИО	Сведения об утверждении типа СИ	Дата следующей поверки (аттестации)	Примечание
Средства измерений					
...	- ...	- ...	-
...	- ...	- ...	-
Испытательное оборудование					
-	-	- ...	- ...		
	...	- ...		- ...	- •

Примечание. Отдельным разделом в таблицу целесообразно включить вспомогательные средства и устройства, используемые при аттестации.

Вспомогательное оборудование					
...	
...

ЛИТЕРАТУРА

1. Российская метрологическая энциклопедия / под ред. проф. Ю.В. Гарбева. – М.: Лики России, 2001.
2. Метрологическое обеспечение эксплуатации измерительной техники / Г.П. Богданов, В.А. Кузнецов, М.А. Лотонов и др.; под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Радио и связь, 1990.
3. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 1977.
4. Селивеев Н.Н., Строка А.А., Форсилова И.Д. Основы теории измерений. – М.: Воениздат, 1977.
5. Курзенков Г.Д. Основы метрологии в авиаприборостроении: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1990.
6. Екимов А.В., Ревяков М.И. Надежность средств электроизмерительной техники. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Кассандрава О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970.
8. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Основы метрологии: учеб. пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1995.
9. Основы метрологического обеспечения оборонной продукции: учеб. пособие / под ред. проф. В.Н. Храменкова. – М.: Учебно-методический центр метрологической подготовки, 2003.
10. Новицкий П.В., Зорграф И.А., Оценка погрешности результатов измерений – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ (ред. от 05.04.2016) «О техническом регулировании».
12. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «Об обеспечении единства измерений».
13. Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».
14. ГОСТР 8.000-2015 «Государственная система обеспечения измерений. Основные положения».

Геннадий Петрович Богданов,
Владимир Геннадьевич Исаев,
Ольга Александровна Воейко,
Юрий Анатольевич Клейменов

МЕТРОЛОГИЯ

Учебное пособие

Книга издается в авторской редакции

Подписано в печать 11.05.2018 г.
Объем 13,875 п.л. Тираж 50 экз. Заказ № 2439.

Отпечатано с предоставленных оригинал-макетов
в типографии «Канцлер»
150008, г. Ярославль, ул. Полушкина роща, д. 16, стр. 66а.
Тел.: 8-4852-58-76-33; 8-4852-58-76-39
E-mail: kancler2007@yandex.ru