Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет»

Г. Н. СОЛОПЧЕНКО

МЕТРОЛОГИЯ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. СЕРТИФИКАЦИЯ

ОСНОВЫ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕТРОЛОГИИ

Издание третье
переработанное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлениям подготовки магистров
«Системный анализ и управление», «Приборостроение»,
«Электроэнергетика», «Электротехника»

Санкт-Петербург
2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем учебном пособии рассматриваются такие важные компоненты общей федеральной дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация», как законодательная и прикладная метрология, которые не могут быть реализованы вне стандартизации, и без которых не может осуществляться сертификация продукции и услуг. Несмотря на объявленное Законом РФ «О техническом регулировании» добровольное применение стандартов, они все-таки играют существенную роль в метрологической практике. Эта роль подчеркивается большим количеством ссылок, сделанных в настоящем пособии на действующие стандарты, которые перечислены в библиографическом списке. Многообразие метрологических стандартов и многогранность прикладной метрологии оправдывают создание настоящего учебного пособия, отдельно посвященного метрологии.

Слово «*метрология*», составлено из корней двух греческих слов: μετρημα — измерять и λογος — слово, учение. Если учесть дополнительно, что греческое слово μετρον означает меру, то, по-видимому, наилучшей русской трактовкой сложного слова «*метрология*» можно считать «учение об измерениях, опирающихся на материальные меры». Основной задачей, которую исполняют лица, действующие в области метрологии, — это обеспечение взаимного доверия к результатам измерений независимо от места, где эти измерения выполнены. Такая задача имеет общемировое значение, поскольку взаимное доверие к результатам измерений позволяет осуществлять международные торговые операции, а также плодотворное сотрудничество различных государств в науке, промышленности, экологии, судопроизводстве, спорте. Решение этой задачи достигается за счет разработки и хранения в каждой стране государственных эталонов международных единиц измеряемых величин, периодического международного сличения этих эталонов, а также постоянной работой внутренних метрологических служб каждого государства по обеспечению сохранности показателей точности эксплуатируемых средств измерений и по передаче размеров единиц величин от государственных эталонов к рабочим средствам измерений. Необходимость обеспечения и контроля сохранности показателей точности средств измерений и корректности методик измерений побудило снабдить метрологические службы надзорными функциями.

Приведем современное определение метрологии.

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

Современная метрология, являясь естественным монопольным видом деятельности, объединяет в себе теоретическую метрологию, законодательную метрологию и практическую метрологию.

Теоретическая (фундаментальная) метрология — область метрологии, предметом которой является разработка фундаментальных научных основ метрологии, усовершенствование существующих и разработка новых государственных первичных эталонов величин, подлежащих измерению.

Достижения в области теоретической метрологии основаны на применении математики, физики, химии и результатов других наук, с помощью которых создаются государственные эталоны единиц тех величин, которые необходимо измерять, а также совершенствуются существующие эталоны. Лучшими из всех эталонов могут быть эталоны, основанные на физических постоянных.

Законодательная метрология — область метрологии, предметом которой является установление единых метрологических правил и норм, направленных на обеспечение единства измерений, а также законодательно установленных правил контроля над их исполнением.

В точном соответствии с определением основная деятельность в области законодательной метрологии заключается в разработке законов РФ, а также в разработке и утверждении стандартов и иных нормативных документов метрологического назначения и в контроле над их исполнением.

Практическая (прикладная) метрология — область метрологии, предметом которой являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

К области практической метрологии относятся все работы, связанные с экспериментальным метрологическим испытанием средств измерений, с разработкой методик выполнения измерений и синтезом измерительных каналов измерительных систем по метрологическим критериям. В последнее время в сферу практической метрологии входят работы по определению и контролю погрешности, вносимой в результаты измерений программами обработки данных, а также работы по обеспечению и контролю защиты программного обеспечения средств измерений от искажений. Все эти работы выполняются в России с соблюдением требований законов РФ, стандартов и других нормативных документов, за счет чего и обеспечивается взаимное доверие к результатам измерений.

Начало осознания всемирного значения метрологии было положено в городе Севр под Парижем, где 20 мая 1875 года (по новому стилю) по инициативе России и Франции была учреждена первая межгосударственная организация «Международное Бюро Мер и Весов» (МБМВ) и подписана метрическая конвенция. В настоящее время количество подписей под метрической конвенцией достигло 49. По призыву ЮНЕСКО день 20 мая ежегодно предложено считать всемирным днем метрологии. Государственная дума России ратифицировала это предложение ЮНЕСКО.

Со дня учреждения МБМВ число международных метрологических организаций в Европе и в мире возросло. Это международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), международная измерительная комиссия (ИМЕКО), Европейская организация по метрологии (ЕВРОМЕТ), Северо-Американская организация по метрологии (НОРАМЕТ). Отмеченный организационный рост и авторитет метрологии в полной мере отвечает достигнутым в XX веке гигантским успехам в области измерений.

В настоящем учебном пособии основное внимание уделяется актуальным аспектам законодательной и практической метрологии и в какой-то мере затрагивается область теоретической метрологии. Эти три области настолько тесно переплетены, что полностью их разделить невозможно. Что можно было выделить в части законодательной метрологии, содержится в первом разделе настоящего учебного пособия. В остальных разделах различные метрологические вопросы излагаются совместно с указаниями их принадлежности к областям.

Детальное ознакомление с особенностями исполнения метрологических работ на предприятиях обычно происходит в рабочем порядке. Настоящее учебное пособие не является единственным источником необходимых начальных сведений о выполнении метрологических работ и о законодательных метрологических документах. Лица, заинтересованные в более разностороннем ознакомлении с метрологическими задачами современности и методами их решения, могут почерпнуть дополнительную информацию, например, из книг [1, 2].

1. ОТДЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ МЕТРОЛОГИИ

1.1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ КАК ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ МЕТРОЛОГИИ

Единство измерений (*traceability of a measurement*) — состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

Единство измерений достигается благодаря единообразному представлению границ интервалов, содержащих погрешность, математически корректному их определению и экспериментальному оцениванию при условии правильного, адекватного измерительной задаче выполнения методики измерения. Перечисленные факторы являются основными характеристиками качества измерений и поэтому все они в совокупности обеспечивают взаимное доверие к результатам измерений независимо от государства и места, где они выполняются.

Упомянутые в определении границы, построенные по обе стороны от результата измерения, являются границами интервала, о котором с указанной там же вероятностью можно утверждать, что истинное значение измеряемой величины находится внутри него. Понятно, что этот интервал является выражением такого *свойства* результата измерения, как степени остаточной неопределенности значения измеряемой величины, которую не удалось преодолеть с помощью выполненного измерения. Поскольку свойство «неопределенность» не может иметь количественного выражения, это свойство характеризуется границами интервала и его вероятностной мерой. Как мы увидим из дальнейшего, на языке классической математической статистики этот интервал представляет собой не что иное, как доверительный интервал, накрывающий искомое истинное значение измеряемой величины с доверительной вероятностью.

Во многих странах мира, в том числе, в России единство измерений обеспечивается соответствующими законами. Именно посредством таких законов и государственной системы метрологических стандартов гарантируется взаимное доверие к результатам измерений во всем мире. Исключительная важность обеспечения единства измерений следует из того, что в подавляющем большинстве случаев результаты измерений являются исходной информацией для принятия решений. В самом деле, любой организм в неизвестной окружающей среде, большинство систем управления технологическими процессами, органы управления социумом или армией действуют по одинаковой общей схеме, представленной на рис. 1.1. Неверная или ложная информация, полученная на первой стадии, неизбежно ведет к неправильным действиям и, возможно, к катастрофическим последствиям. В технической, научной и других сферах первая стадия с частичным участием второй — это измерения или, точнее, измерительные информационные технологии.

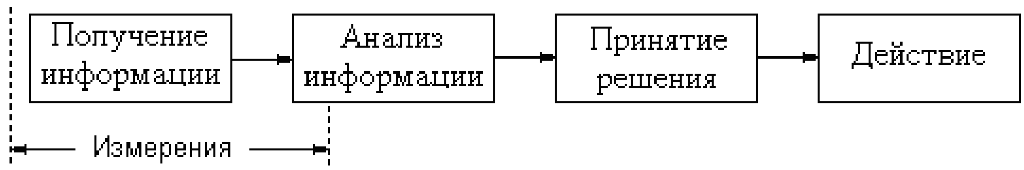

Рис. 1.1. Место и роль в технических и биологических системах

Подобное состояние измерений приобретает особое значение для научного, технического и экономического международного сотрудничества и торговли, при разрешении спорных вопросов и претензий как внутри стран, так и на межгосударственном уровне. Побудительными актами для обеспечения взаимного доверия к результатам измерений в каждой стране кроме государственного закона об обеспечении единства измерений являются метрологические стандарты и иные нормативные документы, которыми регламентируются правила нормирования и контроля показателей точности средств измерений, выполнение мер по обеспечению их длительной сохранности, методики измерений и метрологических испытаний, схемы передачи размеров единиц величин от государственных эталонов к рабочим средствам измерений, принципы защиты метрологического программного обеспечения от искажений и многое другое. Система стандартов метрологического назначения в России выделяется нумерацией стандартов, начинающейся символами **8.**, и названием стандартов, которое начинается с аббревиатуры **ГСИ**, означающей: **«Государственная система обеспечения единства измерений»**. В качестве примера можно привести стандарт ГОСТ 8.009 [3], являющийся одним из основополагающих метрологических стандартов.

В обязательном порядке отметим также, что метрология является непременной частью работ по повышению культуры производства и улучшению качества продукции. Ни один стандарт международной организации по стандартизации (ИСО), регламентирующий качество продукции (стандарты ИСО 9000), не обходится без требований к метрологическому обеспечению производства.

Очень важное значение имеет обеспечение взаимного доверия к результатам измерений, выполняемых при экологическом мониторинге, при криминалистических исследованиях, при спортивных состязаниях. Во всех перечисленных ситуациях без доверия к результатам измерений невозможно подтверждение экологических протоколов, зафиксированных мировых рекордов, выводов судебной экспертизы.

Для подтверждения соответствия качества продукции установленным на нее нормам выполняется сертификация, которая невозможна без проведения испытаний, то есть без измерений. Измерения при сертификационных испытаниях должны, безусловно, отвечать требованиям законодательства о единстве измерений. Только благодаря этому обеспечивается международное взаимное доверие к выданным сертификатам на продукцию. Наглядная иллюстрация взаимной зависимости между стандартизацией, метрологией и сертификацией представлена на рис. 1.2.

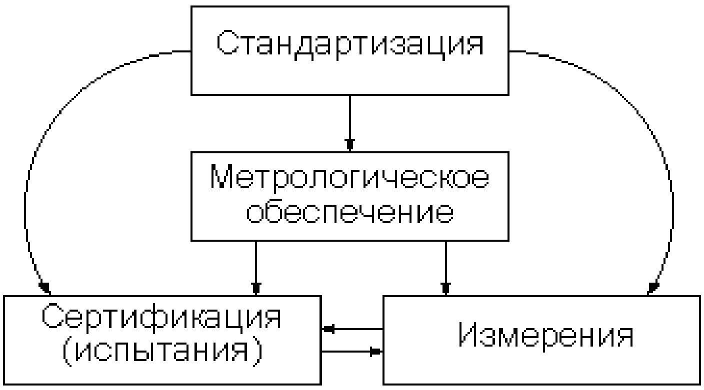

Рис. 1.2. Взаимосвязи между метрологией, стандартизацией и сертификацией

Требования к обеспечению единства измерений, или иначе, требования к обеспечению взаимного доверия к результатам измерений должны быть едиными во всем мире и поддерживаться не только правительствами стран, но и предпринимателями, заинтересованными в распространении своей продукции на мировом рынке. Эти вопросы решаются государственными метрологическими службами и координируются международными метрологическими организациями, которые должны обеспечивать высокое качество измерений. Основной характеристикой качества измерений является погрешность результатов, поскольку именно она порождает размер интервала неопределенности значения измеряемой величины, оставшейся после выполнения измерений.

Разнообразные функции, выполняемые с целью обеспечения единства измерений, в совокупности являются особой областью деятельности, именуемой *метрологическим обеспечением.* Сфера деятельности и цели метрологического обеспечения раскрыты в разд. 1.3.

1.2. ЭТАПЫ, ИНСТРУМЕНТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

1.2.1. Основные понятия

Величина — свойство физического объекта (явления, вещества, изделия, биологического объекта), которое может определяться количественно.

Размер величины — количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «величина».

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

Эти три определения требуют пояснений. Такие понятия, как упругость, чувствительность, неопределенность, магнитное поле, переменное напряжение и тому подобные не могут быть определены количественно. Но коэффициент упругости, коэффициент чувствительности, интервал неопределенности, индукция и напряженность магнитного поля, амплитуда, частота, фазовый сдвиг переменного напряжения могут быть определены количественно, поэтому они могут быть оценены или определены количественно и могут быть выражены в виде некоторого числа принятых для них единиц.

Единица величины — величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице.

Измерение — познавательный процесс, заключающийся в нахождении численного значения измеряемой величины опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений.

Наиболее распространенными видами измерений являются прямые и косвенные измерения.

Прямое измерение (*direct measurement*) — измерение, при котором результат измерения получают непосредственно из опытных данных.

В некоторых случаях прямое измерение величин оказывается невозможным или нецелесообразным. Тогда прибегают к *косвенным измерениям*.

Косвенное измерение (*indirect measurement*) — определение искомого значения физической величины путем вычислений на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с измеряемой величиной.

Измеряемая величина — величина, подлежащая измерению.

Абсолютная погрешность измерения – разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины, выражается в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения – отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины, выражается в процентах.

Влияющая величина (*influence quantity*) — величина, оказывающая влияние на результаты и на погрешности измерений, но не являющаяся измеряемой.

Средство измерений — техническое средство, предназначенное для выполнения измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Метрологическая характеристика — характеристика метрологических свойств средства измерений, оказывающая влияние на результаты измерений и погрешности измерений.

Практические измерения могут быть выполнены в *статическом* и *динамическом* режимах. Наиболее очевидный статический режим измерений имеет место при измерении постоянной (неизменной во времени) величины. Однако статическим режимом целесообразно считать также такой режим измерений изменяющейся величины, при котором верхняя частота ее спектра гораздо меньше верхней частоты полосы пропускания средства измерений, то есть в этом режиме инерционность средства измерений настолько мала, что оно реагирует на медленные изменения измеряемой величины, как безинерционное. И в этом случае для оценки погрешности результата измерения не нужно применять специфические метрологические характеристики, описывающие инерционные свойства средства измерения и использованные в разд. 2.4, 2.5, 2.7, 3.3.

Приведем соответствующие определения.

Статический режим измерений — режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины и инерционностью средств измерений, пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

Динамический режим измерений возникает при весьма быстром изменении измеряемой величины, и для оценки погрешности результата измерений в этом режиме приходится использовать специфические, а именно динамические метрологические характеристики средства измерения.

Динамический режим измерений — режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины, существенны по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

1.2.2. Основные этапы измерительных процедур

Основные этапы современных процедур прямых измерений, выполняемых в статическом и динамическом режимах, представлены на рисунке 1.3. Для статического режима измерений применены независящие от времени обозначения сигналов измеряемой величины и сигналов измерительной информации. В динамическом режиме измерений эти сигналы зависят от времени, и для их представления применены не только функции времени, но и преобразования Лапласа, справедливые только при использовании линейных средств измерений.

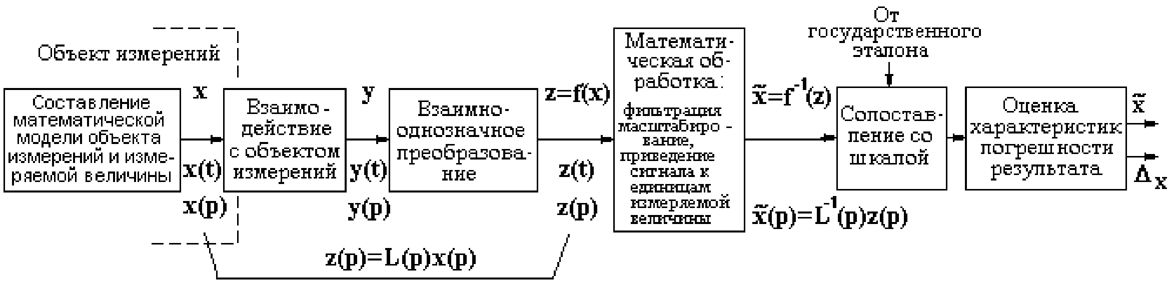

Рис.1.3. Этапы прямых измерений в статическом и динамическом режимах

Перед планированием и выполнением любой измерительной процедуры необходимо формализовать и составить математическую модель объекта измерений и измеряемой величины, которая на рис. 1.3 обозначена: для статического режима измерений как *x*, для динамического режима – как *x(t)* и в виде преобразования Лапласа, как *x(p)*. Так например, перед измерением диаметра стержня необходимо считать его круглым цилиндром с указанием отклонений от круглости. При измерении температуры воздуха в некотором объеме необходимо представить модель распределения температуры в этом объеме и сформулировать измеряемую температуру как величину: среднюю по объему, как минимальную, как максимальную или как температуру в какой-либо точке объема. При исследовании магнитного поля необходимо определить какой параметр его математической модели мы собираемся измерять: магнитную индукцию, магнитодвижущую силу или магнитный поток. Измерению переменного напряжения должно предшествовать представление его математической модели, например, в виде гармонического процесса $u(t)=U_m\sin(2\pi ft+\varphi)$ с указанием, какой именно параметр: амплитуду U_m, частоту *f*, или фазовый сдвиг φ или отличие формы сигнала от синусоидальной, то есть коэффициент нелинейных искажений мы намереваемся измерить.

На следующем этапе организуется взаимодействие измерительного инструмента с объектом измерений. Этот этап является важнейшим в процедуре восприятия информации от объекта. В нем сконцентрирована физическая, информационная и философская сущность измерений как познавательного процесса. Именно здесь сталкиваются две противоположные стороны любого познания: без контакта с объектом познание невозможно, но этот контакт с объектом приводит к взаимному искажению средства измерений – со стороны объекта и объекта – со стороны средства измерений, в результате чего часть информации теряется. Наиболее четкой формализацией такого дуализма является известное из квантовой механики соотношение Гейзенберга между неопределенностью импульса Δp и неопределенностью координаты Δx частицы: $\Delta p \cdot \Delta x \approx h$, где h – постоянная Планка.

В связи с этим взаимодействие должно быть:

достаточно “деликатным” по отношению к объекту, с тем чтобы извлечь максимум информации при минимальном искажении объекта,

избирательным только по отношению к измеряемой величине и нечувствительным по отношению к иным свойствам и параметрам объекта,

стабильным во времени,

нечувствительным к внешним мешающим факторам: климатическим, механическим и др.

Сигнал измеряемой величины, x или $x(t)$, воздействующий на чувствительный элемент измерительного инструмента, порождает реакцию на выходе данного инструмента в виде сигнала измерительной информации y или $y(t)$, который должен быть связан с сигналом измеряемой величины взаимно однозначной стабильной функциональной зависимостью. Взаимная однозначность всех измерительных преобразований обязательна, поскольку при измерениях по значению выходного сигнала необходимо однозначно определить значение измеряемой величины.

Сигнал измерительной информации, который получается в результате взаимодействия чувствительной части измерительного инструмента с объектом, обычно подвергается преобразованиям, таким как фильтрация, усиление, ослабление, нелинейному преобразованию, а также преобразованию в цифровой код в целях получения сигнала z или $z(t)$, пригодного для дальнейшей математической обработки. Все эти преобразования должны быть взаимнооднозначными, стабильными во времени, не зависящими от действия внешних мешающих факторов. В результате описанных преобразований в статическом режиме сигнал z представляет собой монотонную функцию от измеряемой величины $z = f(x)$, а в динамическом режиме – преобразование Лапласа $z(p)$ сигнала $z(t)$ есть произведение передаточной функции $L(p)$ предстоящих линейных измерительных преобразователей на преобразование Лапласа сигнала измеряемой величины:

$$z(p) = L(p)x(p).$$

Последующая математическая обработка, как правило, выполняется в компьютере и имеет целью приведение сигнала измерительной информации к единицам измеряемой величины и к такому размеру, чтобы обеспечить уверенное сопоставление со шкалой измеряемой величины. В статическом режиме это вычисление обратной функции $\tilde{x} = f^{-1}(z)$, а в динамическом режиме – восстановление изменяющегося сигнала измеряемой величины, что в пространстве образов Лапласа может быть выражено, как $\tilde{x}(p) = L^{-1}(p)z(p)$.. Однако, последняя операция является попыткой решения задачи, которая в функциональном анализе именуется, как обратная задача, и является некорректной ввиду того, что передаточная функция $L^{-1}(p)$ физически нереализуема. Для ее решения необходимо применять методы и приемы регуляризации, которые кратко рассмотрены в последующих разделах настоящего пособия.

Кроме перечисленных вычислений компьютеру поручается выполнять цифровую фильтрацию и масштабирование сигналов, приведение их значений к размерности измеряемой величины, а также другие вычисления, необходимые для реализации функций управления, регулирования, запоминания результатов, оценки технико-экономических показателей и тому подобного.

В конечном итоге в результате соответствующего масштабирования получаются значения, соответствующие размерности измеряемой величины, которые могут быть сопоставлены со шкалой этой величины.

Эта шкала формируется посредством выполнения специальной метрологической процедуры, которая заключается в передаче размера единицы измеряемой величины от государственного первичного эталона к данному рабочему средству измерения этой величины. На практике эта процедура (поверка или калибровка) выполняется перед выполнением измерений, но на данной схеме показана оценка характеристик погрешности каждого результата измерений, которая была бы невозможна без этой заранее выполненной процедуры.

Обязательным заключительным этапом измерения является формирование и представление результата измерения и характеристик Δ_x погрешности этого результата, то есть характеристик остаточной неопределенности значения измеряемой величины.

1.2.3. Виды средств измерений

Качество выполняемых измерений в значительной степени определяется качеством применяемого технологического оборудования и корректностью его использования в измерительных технологиях.

Используемое технологическое оборудование:

измерительные инструменты – средства измерений – основное оборудование,

вспомогательное оборудование, в том числе, средства вычислительной техники – компьютеры, процессоры, микропроцессоры, периферийные устройства, средства передачи и хранения информации.

Качество основного технологического оборудования – средств измерений определяется его метрологическими характеристиками, их сохранностью во времени и независимостью от действия внешних влияющих факторов.

Средства измерений подразделяются на следующие основные 4 вида.

Мера (material measure) – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины одного или нескольких заданных размеров с нормированной точностью.

Однозначная мера – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера. Например, гиря, стержень длиной 1 метр, нормальный элемент, катушка сопротивления размером 1 Ом, стандартный образец двухкомпонентного вещества (газа, жидкости, сплава).

Многозначная мера – мера, воспроизводящая одну физическую величину нескольких размеров. Например, набор гирь разной массы, магазин сопротивлений.

Стандартный образец – мера в виде вещества (материала), состав или свойство которого установлены при аттестации.

Калибратор – многозначная мера, как правило, допускающая управление от компьютера.

Измерительный прибор (measuring instrument) – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой величины в форме, доступной для непосредственного восприятия оператором.

Аналоговые и *цифровые* измерительные приборы отличаются видом представления (индикации) значений измеряемой величины. Множество значений, которые представляет индикатор аналогового прибора, непрерывно. Самыми распространенными аналоговыми измерительными приборами являются стрелочные измерительные приборы, в которых отсчет значения измеряемой величины осуществляется по взаимному положению стрелки (или иного указателя) и материальной шкалы. При этом чаще всего подвижная стрелка перемещается относительно неподвижной шкалы. Иногда подвижной является шкала, а стрелка (указатель) неподвижна. В некоторых аналоговых приборах (например, в ртутных термометрах) значение измеряемой величины преобразуется в длину визуально фиксируемого отрезка, снабженного шкалой.

Индикатор цифрового прибора цифровой. Он представляет результаты измерений в единицах измеряемой величины из дискретного множества значений, разделенных, как правило, одинаковыми интервалами, называемыми *интервалами квантования*. Ширина интервала квантования есть не что иное, как погрешность округления. Она обратно пропорциональна количеству разрядов кода (в основном, десятичного), применяемого в конкретном приборе.

Измерительный преобразователь (measuring converter) – средство измерений, предназначенное для взаимно однозначного преобразования *сигнала измеряемой величины* или *сигнала измерительной информации,* действующего на входе преобразователя, в выходной сигнал, удобный для дальнейших преобразований, обработки, передачи и (или) хранения.

Сигнал измеряемой величины – изменяющаяся во времени измеряемая величина. Сигнал измеряемой величины – частный случай сигнала измерительной информации.

Сигнал измерительной информации – сигнал, функционально взаимно однозначно связанный с сигналом измеряемой величины.

Выходной сигнал измерительного преобразователя не может быть непосредственно воспринят оператором, без применения индикатора.

Датчик (сенсор, первичный измерительный преобразователь) – измерительный преобразователь, на входе которого непосредственно действует измеряемая величина. Под действием измеряемой величины датчик вырабатывает сигнал измерительной информации, то есть сигнал, функционально взаимно однозначно связанный с сигналом измеряемой величины.

Измерительными преобразователями кроме датчиков являются усилители, фильтры (вторичные измерительные преобразователи), коммутаторы, преобразователи непрерывных (аналоговых) величин в цифровой код (*аналого-цифровые преобразователи*, АЦП), преобразователи цифрового кода в аналоговый сигнал тока или напряжения (*цифроаналоговые преобразователи*, ЦАП).

Примеры измерительных преобразователей – термопара, измерительный трансформатор, измерительный усилитель, термометр сопротивления, датчики давления, параметров вибраций, скорости газа и пр.

Измерительная информационная система (measuring information system) – средство измерений, предназначенное для измерения нескольких однородных или неоднородных величин и представляющее собой совокупность датчиков, измерительных преобразователей и вспомогательных устройств, в том числе, компьютеров, функционирующих как единое целое.

Структура современных измерительных информационных систем (ИИС) представлена на рис. 1.4.

Обычно количество измерительных каналов в ИИС достигает нескольких (до нескольких тысяч) измерительных каналов. Каждый канал представляет собой последовательное соединение измерительных преобразователей, первым из которых является датчик. С помощью коммутатора, управляемого от процессора, сигналы измерительной информации каждого j–го канала поочередно подключаются на вход АЦП, на выходе которого при каждом таком подключении формируется числовое значение

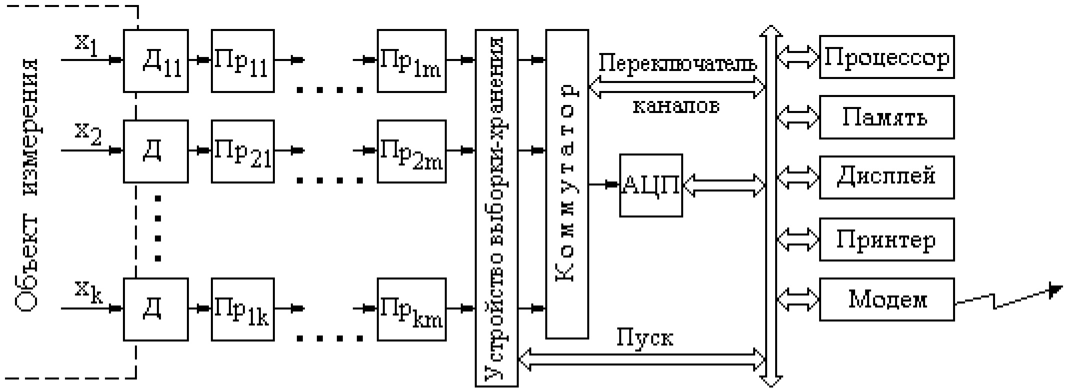

Рис. 1.4. Типовая структура современных измерительных информационных систем

соответствующей измеряемой величины, как правило, в двоичном коде. Переключение каналов в ИИС выполняется последовательно в моменты времени $t_i + (j-1)\Delta t$, где t_i – время подключения к АЦП первого канала, j – номер канала, Δt – время, которое в соответствии с принятым в ИИС интерфейсом затрачивается на выполнение протокола обмена между компьютером и коммутатором, между компьютером и АЦП, на выполнение компьютером программ управления, на аналого-цифровое преобразование, а также на срабатывание устройств сопряжения. Однако, несмотря на различие моментов измерения, все результаты относятся к одному моменту, а именно к началу цикла опроса каналов t_i. Если измеряемые величины изменяются со скоростью dx_j / dt, то результат измерения j–ой величины будет содержать погрешность

$$\Delta x_{aj} = x_j(t_i + (j-1)\Delta t) - x_j(t_i) \approx \Delta t(j-1)(dx_j / dt).$$

Эта погрешность, вызванная неопределенностью момента измерения, называется *апертурной погрешностью*. Она появляется только в том случае, когда измеряемые величины существенно изменяются за время опроса каналов. В статическом режиме измерений, когда измеряемые величины почти не изменяются, апертурная погрешность отсутствует.

Средством практически полного исключения апертурной погрешности может служить многоканальное устройство выборки-хранения, все каналы которого в момент запуска от компьютера переходят из режима слежения, когда сигнал на выходе повторяет сигнал на входе, в режим запоминания. Таким образом, на выходе всех каналов устройства выборки–хранения оказываются неизменные значения всех сигналов, соответствующие одному и тому же значению времени запуска t_i. Эти значения последовательно преобразуются АЦП в двоичный код и передаются в компьютер, в котором каждое из полученных двоичных чисел сопоставляется со шкалой соответствующей измеряемой величины. В результате такого сопоставления формируются значения измеряемых величин в их единицах и тем самым выполняется прямое измерение. Последующие операции (математическая обработка, хранение, передача, визуализация результатов измерений) производятся в соответствии с целями эксперимента компьютером и иными средствами, входящими в состав системы.

Некоторые распределенные в пространстве ИИС строятся на базе компьютерных сетей. Диспетчеризация работы таких распределенных ИИС и обмен информацией выполняются с помощью сетевого программного обеспечения и средств межмашинной связи (телефонные каналы, радиоканалы, оптоволоконные линии связи, каналы спутниковой связи и др.). Для соединения с этими каналами предусматривается соответствующий модем.

За последнее время электронные технологии, технологии создания и архитектура компьютеров достигли выдающихся успехов. Интеграция и существенное улучшение технических характеристик электронных микросхем, феноменальные успехи в уплотнении устройств памяти, успехи в организации и в реализации компьютерных сетей и сетей связи, создание новых однопроводных и беспроводных интерфейсов очень сильно повлияли на структуру современных ИИС. Измерительные преобразователи каждого измерительного канала стали настолько компактными, что все они вместе с устройством выборки и хранения (УВХ), коммутатором и АЦП размещаются на одной печатной плате, которая представляет собой один многоканальный измерительный преобразователь выходных сигналов группы однородных датчиков в цифровой код. Для каждой группы датчиков однородных измеряемых величин разрабатываются и выпускаются подобные многоканальные одноплатные измерительные преобразователи, и их номенклатура постоянно расширяется. Конструктивное исполнение таких одноплатных измерительных преобразователей позволяет обеспечивать их совместную работу в унифицированном корпусе (крейте) под управлением компьютера, который встраивается в этот же крейт. Обмен сигналами служебной и измерительной информации между преобразователями и встроенным компьютером осуществляется через общую для всех компонентов шину или объединительную плату вне зависимости от места (слота), куда вставлен одноплатный преобразователь.

и могут находиться на некотором расстоянии от преобразователей, что

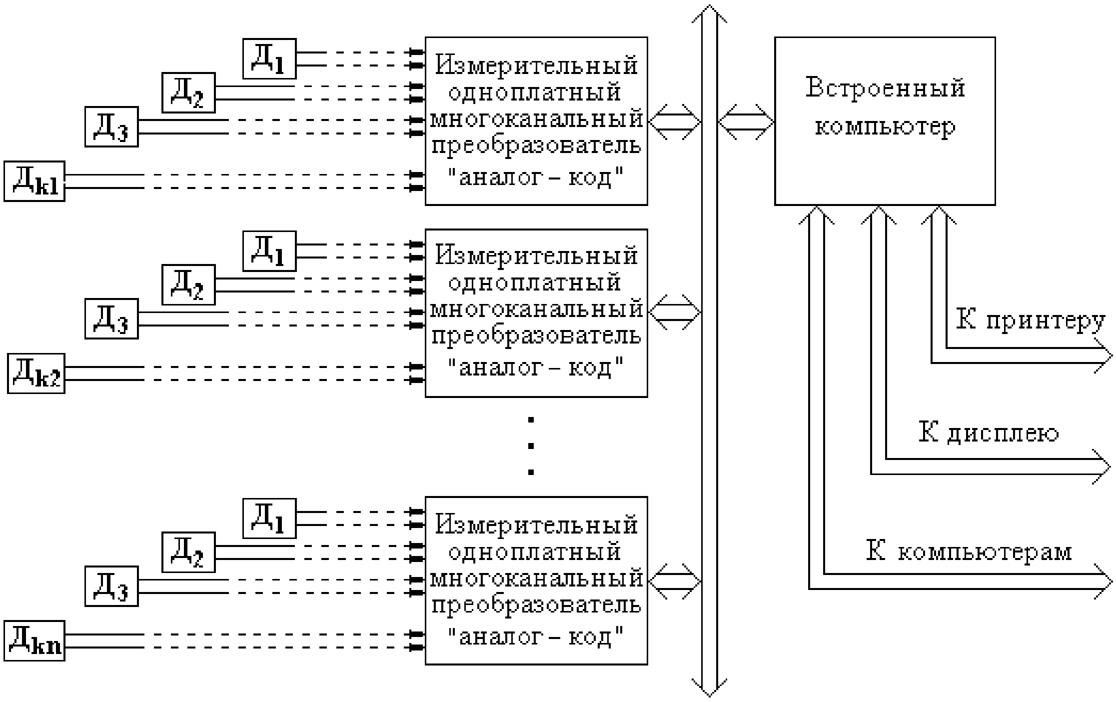

Рис. 1.5. Возможная структура современной локальной ИИС

Одна из возможных структурных схем подобной ИИС представлена на рис. 1.5. К каждому из многоканальных преобразователей подключаются датчики однородных измеряемых величин. Все эти датчики должны иметь однотипные выходные сигналы, изменяющиеся в одном диапазоне, символически показано на рис. 1.5 пунктиром. Если к первому преобразователю подключено $k1$ датчиков, то ко второму преобразователю подключается $k2$ датчиков, предназначенных для измерения других однородных измеряемых величин и так далее. Общее количество преобразователей n. Вычислительные возможности встраиваемых компьютеров, объем памяти и быстродействие в полной мере соответствуют мировому уровню компьютерной техники. К встраиваемому компьютеру могут подключаться внешние устройства, такие, как дисплей и принтер, а также имеется возможность подключения к другим компьютерам с целью создания компьютерной сети, если это необходимо.

Измерительные процедуры, в подобных измерительных системах, выполняются под управлением программного обеспечения используемых компьютеров. Математическая обработка и метрологические свойства результатов таких измерений в сильной степени зависит от программного обеспечения, которое должно сохраняться неизменным в той же степени, как и метрологические характеристики. Эта сохранность и защита программного обеспечения от преднамеренных и непреднамеренных искажений становится одним из факторов обеспечения единства измерений.

1.2.4. Форма представления характеристик погрешности

Результат любого измерения отличается от истинного значения измеряемой величины в силу следующих причин:

- стохастическая природа объекта,
- инерционность средства измерений (проявляется только в динамическом режиме),
- несовершенство средств измерений, вызванное разбросом параметров комплектующих изделий, недостаточной точностью технологического оборудования и т. д.,

- некорректное применение средств измерений, в результате которого вследствие неизбежного взаимодействия средства измерений с объектом могут изменяться свойства объекта и метрологические свойства средств измерений,

- воздействие на средство измерений разнообразных мешающих внешних (механических, климатических и других) факторов, называемых *влияющими величинами*.

В данном разделе будут рассмотрены разнообразные формы представления и выражения характеристик погрешности измерений в статическом режиме. Погрешности измерений в динамическом режиме будут рассмотрены позже в разделах 2.4, 2.5, 2.7, 3.3.

Итак, предположим, что измеряемая величина не изменяется во времени, а ее истинное значение есть x. Пусть $\tilde{x}$ результат измерения, тогда разность $\Delta x = \tilde{x} - x$ есть *абсолютная погрешность результата измерений*.

Истинное значение измеряемой величины, конечно, неизвестно. Поэтому в последующем тексте этот термин используется в качестве модельного понятия, которое участвует в описании математической модели измерений и погрешностей измерений.

Абсолютная погрешность результата измерений (*absolute error*) — разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины, выражается в единицах измеряемой величины.

Значение абсолютной погрешности не может быть определено в виде числа из-за того, что истинное значение x измеряемой величины неизвестно. По этой причине результат каждого измерения содержит неустранимую неопределенность значения измеряемой величины, и поэтому на практике может идти речь только об оценке каких-либо характеристик погрешности измерений, но не значений погрешности. Наиболее распространенной характеристикой погрешности является интервал $(\Delta_{\text{Н}}, \Delta_{\text{В}})$, ограниченный предельными или предельно допускаемыми значениями. Обычно принимают $\Delta_{\text{Н}} = -\Delta_{\text{В}} = -\Delta_x$, то есть считают этот интервал симметричным относительно нуля: $\left(-\Delta_x, \Delta_x\right)$. Границы именно этого интервала фигурируют в определении единства измерений.

В общем случае погрешность измерения Δx может содержать систематическую и случайную составляющие.

Систематическая составляющая погрешности, систематическая погрешность — погрешность, значения которой остаются неизменными при повторных измерениях одной и той же неизменной измеряемой величины в одинаковых условиях.

Случайная составляющая погрешности, случайная погрешность — погрешность, значения которой изменяются случайным образом при повторных измерениях одной и той же неизменной измеряемой величины в одинаковых условиях.

При многократном измерении величины в статическом режиме, истинное значение которой равно x, результаты измерений будут попадать на ось с различной плотностью, которая будет определяться характером случайной составляющей погрешности. Пусть $\tilde{x}$ — один из результатов измерений. В соответствии с определением абсолютной погрешности мы можем заключить, что форма плотности распределения случайной погрешности $\Delta x = \tilde{x} - x$ будет повторять форму плотности распределения результатов измерений. Тогда можно назначить такие границы $\left(-\Delta_x, \Delta_x\right)$**,** чтобы интервал, лежащий между ними, содержал сумму обеих составляющих погрешности с вероятностью P_0 = (0,8 ÷ 0,95). Математическая запись этого интервала имеет вид:

$$P(-\Delta_x \le \Delta x \le \Delta_x) = P_0,$$

где Δ_x есть не что иное, как характеристика общей абсолютной погрешности результата измерения, $P(\bullet)$ — вероятность события, обозначенного в скобках.

Если при измерениях существует возможность определить систематическую погрешность Δ_c и внести в результат поправку на нее, то интервалом неопределенности достаточно характеризовать только случайную составляющую. В этом случае ширина интервала, содержащего погрешность, уменьшается. Интервал неопределенности истинного значения измеряемой величины определяется выражением:

$$P(\tilde{x} - \Delta_c - \Delta_x \leq x \leq \tilde{x} - \Delta_c + \Delta_x) = P_0.$$

Указанная интервальная характеристика погрешности результата измерения есть не что иное, как интервальная характеристика остаточной неопределенности значения измеряемой величины.

Характеристика погрешности результата измерений Δ_x *есть основная характеристика качества измерения и остаточной неопределенности значения измеряемой величины в статическом режиме*. Единство измерений, то есть взаимное доверие к результатам измерений может быть достигнуто только в тех случаях, когда результат каждого измерения сопровождается оценкой характеристики погрешности этого результата.

Форма выражения характеристики погрешности результата измерений в статическом режиме может быть двоякой: в виде предельного значения Δ_x абсолютной погрешности, либо в виде предельного значения γ_x *относительной погрешности*, где $\gamma_x = \Delta_x/x$. Обычно относительная погрешность выражается в процентах: $\gamma_x = \Delta_x/x \cdot 100\ \%$

Относительная погрешность результата измерений (*relative error*) — отношение абсолютной погрешности результата измерений к истинному значению измеряемой величины, выражается в относительных единицах или в процентах.

Поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно, относительная погрешность вычисляется по отношению к результату измерения. Покажем, что такая замена в большинстве случаев допустима, ибо она приводит к изменению значения относительной погрешности на величину второго порядка малости:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{\tilde{x}} = \frac{\Delta x}{x + \Delta x} = \frac{\Delta x}{x}\frac{1}{\left(1 + \dfrac{\Delta x}{x}\right)} = \frac{\Delta x}{x}\left(1 - \frac{\Delta x}{x} + \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 - \dots\right) =$$

$$= \frac{\Delta x}{x} - \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \dots \approx \frac{\Delta x}{x}.$$

Выполненные точные преобразования показывают, что при относительной погрешности, равной сотым долям, уже второе слагаемое примет значение в десятитысячные доли, которые не имеет смысла учитывать в числовом выражении характеристик погрешностей. Приведенное заключение находится в точном соответствии с правилами округления результатов измерения и характеристик погрешностей, приведенными в разд. 1.7.

В заключение раздела заметим, что надзор за единообразием выражения основных характеристик качества измерений, а именно, погрешностей, надзор за сохранностью метрологических характеристик средств измерений и вследствие этого сохранения — надзор за обеспечением взаимного доверия к результатам измерений — все эти функции в совокупности входят в круг задач *метрологического обеспечения.*

1.3. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Метрологическое обеспечение (*metrological assurance*) — установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, которые выполняются во всех без исключения сферах деятельности человека.

Метрологическое обеспечение отраслей науки и промышленности, экологического мониторинга, здравоохранения, торговли, контроля безопасности, вооружений и судебного производства заключается в выполнении следующих основных функций:

- разработка, изготовление и хранение государственных эталонов, воспроизводящих единицы измеряемых величин,
- осуществление международных сличений государственных эталонов, передача размеров единиц величин от государственных эталонов рабочим средствам измерений в соответствии с поверочной схемой (*traceability chart*),
- разработка законодательных актов и нормативных документов в области метрологии и практических измерений, контроль над их исполнением,
- разработка и промышленный выпуск рабочих средств измерений,
- контроль над состоянием и сохранностью декларированных производителем метрологических свойств средств измерений, выпускаемых из производства, а также находящихся в эксплуатации или на хранении,
- разработка методик выполнения измерений, включающих в себя методики оценки характеристик погрешностей результатов измерений, выполнение измерений, контроль над исполнением методик выполнения измерений, метрологическая экспертиза методик измерений,
- выполнение рабочих измерений во всех сферах деятельности и в отраслях народного хозяйства.

В настоящем учебном пособии основное внимание уделяется последним четырем функциям, с которыми тесно связана будущая профессиональная деятельность студентов. Точность результатов конкретных измерений определяется, во-первых, метрологическими свойствами средств измерений и, во-вторых, методикой измерений, которые выполняются в *реальных условиях* (в англоязычной литературе *normal conditions*), оказывающих влияние на конечный результат.

Основным методом контроля сохранности метрологических свойств средств измерений является их поверка или калибровка.

Поверка средств измерений — совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (или другими уполномоченными на то органами) с целью определения и подтверждения соответствия метрологических свойств средства измерений установленным техническим требованиям.

Обязательной поверке подвергаются средства измерений, подлежащие обязательному государственному метрологическому контролю и надзору, а также средства измерений, подлежащие утверждению типа и занесению в государственный реестр средств измерений.

Калибровка средств измерений — совокупность операций, выполняемых с целью определения действительных значений метрологических характеристик и подтверждения пригодности к применению средства измерений, не подлежащего обязательному государственному метрологическому контролю и надзору.

Калибровка выполняется метрологическими службами юридических лиц для собственных нужд. В частности, средства измерений, прошедшие калибровку, но не поверку, не могут быть применены при поверке или калибровке в качестве образцовых средств (рабочих эталонов).

Поверка и калибровка средств измерений производится в жестко ограниченных нормированных условиях, именуемых *нормальными условиями* применения (в англоязычной литературе *reference conditions*). В качестве образцовых средств (рабочих эталонов) для поверки или калибровки должны применяться только средства измерений (рабочие эталоны), прошедшие поверку с положительным результатом.

Основным методом контроля над корректностью методик выполнения измерений являются метрологическая экспертиза этих методик.

Основные работы по метрологическому обеспечению, выполняемые в интересах государства, а именно, разработка и хранение государственных эталонов, фундаментальные исследования в области метрологии, разработка государственных нормативных документов, государственный метрологический надзор подлежат обязательному государственному финансированию. При разработке федеральных и иных государственных программ, в том числе, программ создания и развития производства оборонной техники в них должны быть предусмотрены разделы метрологического обеспечения.

К подобным программам относятся программы обеспечения всех видов безопасности населения по отношению к причинам техногенного, экологического, медицинского, криминального и иного характера.

1.4. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

1.4.1. Государственное управление обеспечением единства измерений

Управление деятельностью по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляет Федеральное Агентство Российской Федерации по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) через подведомственные ему метрологические службы.

Метрологическая служба — совокупность субъектов деятельности и видов работ, направленных на обеспечение единства измерений.

Органами государственной метрологической службы являются:

- государственные научные метрологические центры,
- органы государственной метрологической службы на территориях субъектов федерации,
- государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ),
- государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО),

- государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

Государственный метрологический надзор и контроль соблюдения метрологических правил и норм, установленных законодательными актами, стандартами и другими нормативными документами, осуществляют должностные лица Росстандарта — государственные инспекторы по обеспечению единства измерений.

Государственный метрологический надзор и контроль распространяется на следующие сферы:

- здравоохранение, ветеринарию, охрану окружающей среды, обеспечение безопасности жизнедеятельности,
- торговые операции, в том числе, международные, а также взаимные расчеты между покупателем и продавцом,
- государственные учетные операции,
- обеспечение обороны государства,
- геодезические и гидрометеорологические работы,
- банковские, налоговые, таможенные и почтовые операции,
- производство продукции по контрактам для государственных нужд Российской Федерации,
- измерения, выполняемые при обязательной сертификации продукции и услуг,
- измерения, проводимые по поручению судебных и арбитражных органов,
- регистрацию национальных и международных рекордов.

Государственные органы управления Российской Федерации, а также предприятия, организации и учреждения, являющиеся юридическими лицами, создают в случае необходимости собственные (ведомственные) метрологические службы, которые должны в обязательном порядке участвовать в выполнении работ из вышеприведенного перечня.

Структура метрологических служб представлена на рис. 1.6.

Функции органов метрологической службы, представленных на рис. 1.6, состоят в следующем.

Федеральное агентство РФ по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)

- координирует деятельность по обеспечению единства измерений в Российской Федерации, руководит деятельностью метрологических служб,

- устанавливает правила создания, утверждения, хранения и применения государственных эталонов,

- представляет Государственной Думе Российской Федерации проекты технических регламентов и проекты законодательных актов по вопросам обеспечения единства измерений и предложения по единицам величин, допускаемых к применению,

Рис. 1.6. Метрологические службы Российской Федерации

- определяет общие требования к средствам, методам и результатам измерений,

- утверждает отечественные стандарты,

- участвует в деятельности международных метрологических организаций через своих представителей.

Государственные научные метрологические центры

- несут ответственность за создание, совершенствование, хранение и применение государственных эталонов по своей специализации,
- разрабатывают нормативные документы по вопросам обеспечения единства измерений,
- проводят испытания средств измерений по своей специализации для целей утверждения типа,
- проводят метрологическую экспертизу методик выполнения измерений, проектов, технических заданий на разработку изделий и иных документов,
- обеспечивают научное и методическое руководство органами государственного метрологического надзора и контроля на территориях субъектов федерации,
- осуществляют лицензирование деятельности по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений,
- осуществляют аккредитацию метрологических служб государственных органов, и других юридических лиц на право испытаний и сертификации средств измерений, а также на право аттестации методик выполнения измерений и проведения метрологической экспертизы документов.

Государственные службы ГСВЧ, ГССО, ГСССД осуществляют межрегиональную и межотраслевую координацию работ по обеспечению единства измерений — по специализации служб:

ГСВЧ – государственная служба времени и частоты, при Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений ВНИИФТРИ, Менделеево московской обл., ГССО – государственная служба стандартных образцов, при уральском научно-исследовательском институте метрологии УНИИМ, г. Екатеринбург,

ГСССД – государственная служба стандартных справочных данных, при Федеральном государственном унитарном предприятии "Стандартинформ", г. Москва.

Органы государственной метрологической службы, действующие на территории субъектов федерации, осуществляют на этой территории государственный метрологический надзор и контроль над соблюдением метрологических норм и правил, находящихся в сферах компетентности государственных органов.

Государственные инспекторы по обеспечению единства измерений — непосредственные исполнители работ по государственному метрологическому надзору и контролю на конкретных объектах. Для осуществления надзора и контроля государственный инспектор имеет право посещать любые предприятия независимо от их подчиненности и вида собственности. При выявлении нарушений метрологических правил и норм инспектор имеет право:

- запрещать применение дефектных средств измерений и при необходимости изымать такие средства измерения из эксплуатации,
- представлять предложения по аннулированию ранее выданных лицензий на метрологическую деятельность и по отмене решений об аккредитации метрологических лабораторий и служб,
- давать обязательные предписания о ликвидации нарушений метрологических правил и норм.

Метрологические службы и подразделения органов государственного управления, предприятий, организаций и учреждений относятся к ведомственной метрологической службе и выполняют следующие функции:

- проводят надзор за состоянием и применением средств измерений, за аттестованными методиками выполнения измерений, за соблюдением сроков периодических испытаний средств измерений,
- выпускают обязательные предписания по обеспечению единства измерений в подведомственных им подразделениях.

Как государственные, так и ведомственные метрологические органы и службы проводят метрологические испытания средств измерений двух видов: поверку и калибровку.

Полномочия на право выполнения поверки подтверждаются путем аккредитации соответствующего предприятия или лаборатории органами Росстандарта или государственным научным метрологическим центром — по специализации. В этих случаях аккредитованным метрологическим службам дается право выдавать сертификаты о поверке, калибровке или об утверждении типа средств измерений от имени органов, которые их аккредитовали.

Сертификат об утверждении типа средств измерений — документ, выдаваемый уполномоченными на то метрологическим органом или службой, удостоверяющий, что данный тип средств измерений утвержден в установленном порядке и соответствует установленным требованиям.

После утверждения типа средства измерений оно заносится в *государственный реестр средств измерений*.

Все услуги по поверке и калибровке средств измерений, метрологической экспертизе документов и по сертификации средств измерений подлежат оплате в соответствии с договорами, которые заключаются на этот предмет между заказчиком услуги и ее исполнителем.

Аккредитация метрологических служб юридических лиц на право выполнения метрологических работ выполняется по их инициативе на основе договоров, заключаемых с государственными научными метрологическими центрами, органами государственной метрологической службы Росстандарта в соответствии с их специализацией.

Основные условия аккредитации:

- наличие необходимого метрологического и вспомогательного оборудования,
- наличие квалифицированного персонала,
- наличие библиотеки стандартов и других нормативных документов, необходимых для выполнения заявляемой деятельности по специализации,
- наличие помещений для проведения метрологических работ, соответствующих по площади, состоянию, условиям, санитарным нормам, требованиям выполнения измерений, поверки и калибровки.

1.4.2. Государственные научные метрологические центры России

Государственные научные метрологические центры Российской Федерации и их специализация:

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 198005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19) — главный государственный центр обеспечения единства измерений. Специализация:

- электрические и магнитные величины,
- масса, длина, угол, сила,
- линейные и угловые скорость и ускорение,
- параметры вибраций и удара,
- температура от 0° С и выше,
- теплофизика, пульсации температуры,
- скорость потоков жидкости и газа,
- переменные давления в жидкой среде,
- ионизирующие излучения (активность, дозиметрия, α, β, нейтронные),
- оптика (показатель преломления, колориметрия),
- физико-химические измерения, метрологическое обеспечение экологического мониторинга,

- метрологическое обеспечение робототехники.

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС, 119361, Москва, ул. Озерная, 46) — головная организация государственной метрологической службы. Специализация:

- абсолютное давление,
- высокое и сверхвысокое напряжение,
- шероховатость поверхностей,
- хроматографический количественный анализ,
- измерительные информационные системы.

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ, 119361, Москва, ул. Озерная, 46)

- лазерное излучение (мощность, длина волны, фаза),
- яркость, колориметрия,
- измерения в медицине,
- неразрушающий контроль.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, 141570, Московская обл., Менделеево)

- служба точного времени (время, частота),
- ионизирующие излучения (головной центр),
- температура (ниже 0° С),
- магнитная индукция,
- радиотехнические измерения (высокие частоты и СВЧ),
- твердость,
- акустика и гидроакустика,
- большие длины.

Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ, 620219, Екатеринбург, Красноармейская ул., 4) — головной в области создания и хранения стандартных образцов веществ и материалов, а также ведения государственного реестра стандартных образцов веществ и материалов. Специализация:

- стандартные образцы,
- трансформаторы тока,
- счетчики электрической энергии,
- отклонения от линейности,
- влажность зерна (государственный эталон).

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ, 630004, Новосибирск, ул. Димитрова, 4) — головной институт второй (Сибирской) эталонной базы, хранение резерва государственных эталонов в виде рабочих эталонов. Дополнительная специализация:

- большие массы,
- угол,
- тепловой поток.

Всероссийский научно-исследовательский институт расходометрии (ВНИИР, 420029, Казань, ул. 2 Азинская, 7а).

Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации агропромышленной продукции (ВНИИСагропродукт, 350063, Краснодар, ул. Постовая, 36).

Метрологический центр министерства обороны (Московская обл., Мытищи). Хранение всех рабочих эталонов по основным видам измерений, осуществление метрологического контроля и надзора за средствами измерений, эксплуатирующимися в организациях, учреждениях и подразделениях министерства обороны.

Восточносибирский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (664056, Иркутск, ул. Бородина, 57). Специализация:

- радиотехнические измерения,
- время, частота,
- измерение электрических величин.

Дальстандарт (680000, Хабаровск, ул. К. Маркса, 65). Специализация:

- теплофизика,
- неразрушающий контроль.

1.4.3. Международные метрологические организации

Международная научная и практическая деятельность по обеспечению единства измерений координируется несколькими международными организациями, разграничивающими области своей компетенции по научно-техническому и территориальному признакам.

BIPM — Bureau International des Poids et Mesures (*МБМВ — Международное бюро мер и весов,* г. Севр, Франция) — первая международная организация. Основной вид деятельности — координация работ по международным сличениям государственных эталонов.

OIML — Organisation International de Metrologie Legale (*МОЗМ — Международная организация законодательной метрологии*, г. Париж, Франция) — координирует разработку международных нормативных документов, регламентирующих основные метрологические нормы и правила в области испытаний и применения средств измерений, нормирования и контроля метрологических характеристик средств измерений, разработки и экспертизы методик выполнения измерений и оценки характеристик погрешности измерений.

Деятельность этих двух организаций поддержана нормативными документами, которые разрабатываются с их участием *Международной организацией по стандартизации — ИСО* (*International Organisation for Standartization — ISO,* г. ,Женева, Швейцария). С другой стороны, в документах ИСО применяются метрологические рекомендации, разработанные МБМВ И МОЗМ.

Международная электротехническая комиссия — МЭК (*International Electrotechnical Comission — IEC,* г. ,Женева, Швейцария), применяет в метрологических разделах своих документов правила и методы, установленные МБМВ, МОЗМ, ИСО.

Научная деятельность, посвященная развитию науки об измерениях, теории и практики измерений, проблемам обучения метрологии и измерениям, координируется *Международной Измерительной Конфедерацией — ИМЕКО* (*International Measurement Confederation* — IMEKO, г. Будапешт, Венгрия) посредством организации и проведения международных конгрессов, симпозиумов, научных школ по широкому кругу проблем теории измерений, теоретической, прикладной и законодательной метрологии.

С целью объединения усилий и средств для выполнения дорогостоящих метрологических работ, таких, как создание эталонов, использование эталонов, выполнение поверочных и калибровочных работ, унификации законодательных документов метрологические институты и метрологические лаборатории стран Северной Америки и стран - членов ЕЭС в конце 80 -х годов начали создавать союзы.

В объединенной Европе созданы следующие союзы сотрудничающих институтов и лабораторий.

EUROMET (*ЕВРОМЕТ* — сотрудничество европейских институтов по метрологии) — координирует совместную в рамках стран - членов ЕЭС разработку эталонов и сложных измерительных систем во избежание дублирования, а также совместное использование этих эталонов и установок.

WELMEC — Западно-Европейское сотрудничество в области законодательной метрологии.

WECC — Западноевропейский калибровочный союз.

WELAC — Западноевропейское сотрудничество по аккредитации испытательных лабораторий.

В 1991 году между калибровочными службами стран, входящих в ЕЭС и ЕАСТ (Европейская ассоциация свободной торговли) были заключены первые двусторонние соглашения по взаимному признанию сертификатов о калибровке средств измерений. Эти соглашения были утверждены Европейской организацией по испытаниям и сертификации.

По примеру Европы в 1993 году США, Канада и Мексика организовали союз метрологических институтов NORAMET. Цели этого союза и формы сотрудничества аналогичны тем, которыми руководствуется ЕВРОМЕТ.

Перечисленные европейские объединения и союзы действуют при административной поддержке правительства и парламента объединенной Европы.

КООМЕТ — Восточно-Европейская организация по метрологии, в которую входят следующие государства: Беларусь, Болгария, Казахстан, Литва, Молдова, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Украина.

1.4.4. Передача размеров единиц величин рабочим средствам измерений от государственных эталонов

Основным практическим мероприятием, обеспечивающим единство размеров единиц однородных величин при каждом измерении этих величин вне зависимости от места выполнения измерений, является процедура передачи размера единицы величины от государственного эталона к рабочему средству измерений. Эта процедура, обеспечивающая «прозрачность» (англ. *traceability*) результата каждого измерения до эталона, по сути дела, есть процедура передачи к рабочему средству измерений участка шкалы величины, и результат измерения получается путем сопоставления сигнала измерительной информации с этим участком шкалы.

Указанная процедура строго регламентируется соответствующими нормативными документами, которые называются *поверочными схемами*. Общие принципы составления поверочных схем, относящихся к различным величинам, подлежащим измерениям, изложены в стандарте ГОСТ 8.061 [4].

Поверочная схема — нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, которые участвуют в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений, содержащий описание методов и погрешностей при передаче.

Терминология международных документов, применяемая для обозначения поверочной схемы, неоднозначна. Особенно большим разнообразием отличаются английские названия поверочной схемы: *traceability chart, hierarchy scheme, verification chart*.

Общая структура соподчиненности средств измерений, участвующих в передаче размера единицы (участка шкалы) от государственного эталона рабочим средствам измерений, приведена в ГОСТ 8.061 [4] и представлена на рис. 1.7.

Эталон — средство измерений или комплекс средств измерений, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденные в качестве эталона в установленном порядке.

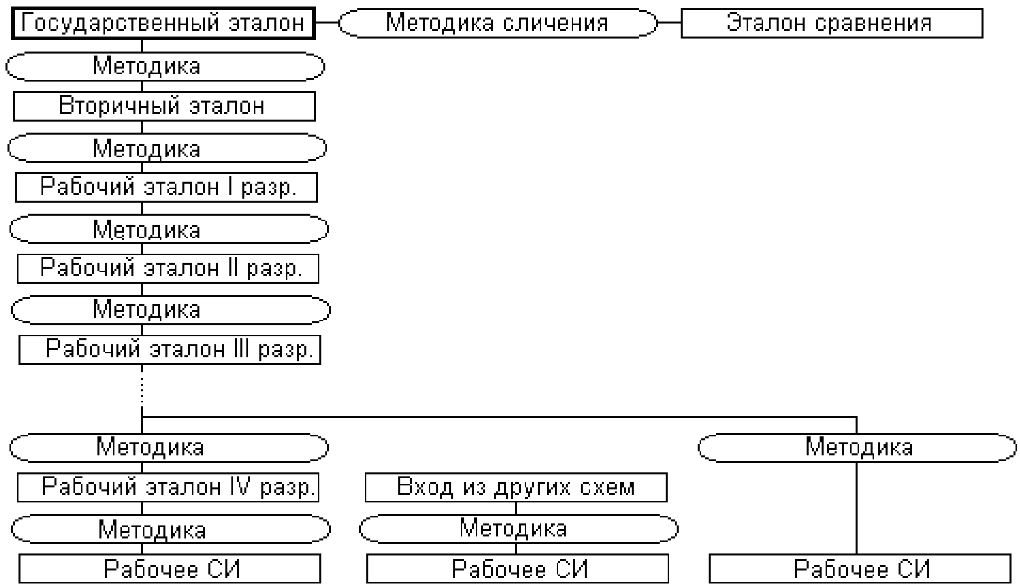

Рис. 1.7. Структура государственных поверочных схем

Государственный первичный эталон (на рисунке — государственный эталон) — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью и признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на всей территории Российской Федерации.

Вторичный эталон — эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы.

Рабочий эталон — эталон, предназначенный для передачи размера единицы (участка шкалы) рабочим средствам измерений. Этот термин заменил собой термин «образцовое средство измерений». При необходимости рабочие эталоны подразделяют на разряды, количество которых не ограничено.

Эталон сравнения — эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Государственный первичный эталон находится во главе поверочной схемы, на ее высшей ступени. На той же ступени находится эталон сравнения, предназначенный для выполнения сличений с международным эталоном или круговых сличений государственных эталонов нескольких стран.

Для обеспечения надлежащей сохранности государственного эталона количество обращений к нему ограничивается. Поэтому предусматриваются вторичные эталоны, которые непосредственно взаимодействуют с первичным эталоном.

Две соседние ступени этой типовой схемы соединены методикой сличения, то есть методикой выполнения передачи единицы или части шкалы со ступени на ступень. Средство измерений, стоящее на верхней ступени из двух соседних, и методика сличения должны обеспечивать погрешность этого сличения не хуже, чем 1/3 от предела допускаемой погрешности, нормированного для рабочего эталона или рабочего средства измерений, стоящего на нижней ступени.

В поверочной схеме величины, зависящей от двух и более величин (например, электрической мощности) предусматривается вход из поверочной схемы другой (других) величин (показано на рис. 1.7).

Передача единицы (части шкалы) на самую нижнюю ступень выполняется при поверке (или калибровке) рабочего средства измерений. Стандартная форма методики поверки (калибровки) приведена в приложении 2). Методы поверки изложены в разд. 1.6. Требования к соотношению характеристик погрешности при этом сохраняются теми же, что установлены для остальных ступеней. Сертификат (протокол) о поверке (калибровке) средства измерений имеет срок годности, установленный для данного средства измерений при утверждении типа. Для продления срока годности этих документов поверка (калибровка) выполняется вновь. Интервал между двумя следующими друг за другом поверками (калибровками), называется *межповерочным интервалом*. Все методики поверки должны в обязательном порядке утверждаться уполномоченным на то государственным органом. Образцовые средства измерений (рабочие эталоны), применяемые для поверки или калибровки, должны быть средствами измерений утвержденного типа и иметь соответствующий документ, свидетельствующий о том, что срок его предыдущей поверки не истек.

При поверке (калибровке) средств измерений для нужд Министерства обороны, применяются образцовые средства измерений (рабочие эталоны), разрешенные для применения на предприятиях и подразделениях Министерства обороны.

Количество ступеней в поверочных схемах различных величин может быть различным. Однако с увеличением количества ступеней точность передачи утрачивается. Поэтому обычно стремятся минимизировать количество этих ступеней. В частности, количество ступеней поверочной схемы времени и частоты может быть сокращено до двух за счет передачи по радиоканалу выходного сигнала эталона секунды, которая воспроизводится косвенно через количество периодов несущей частоты этого сигнала.

Для обеспечения единства измерений при выполнении количественного химического анализа используются стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. ГОСТ 8.315 [5] устанавливает следующие категории стандартных образцов:

- государственные стандартные образцы (ГСО),
- отраслевые стандартные образцы (ОСО),
- стандартные образцы предприятий (СОП).

Стандартным образцам, включенным в поверочные схемы, присваиваются разряды.

В последнее время, в связи с выходом новых международных нормативных документов в области метрологии и необходимостью приближения отечественных документов к международным, Федеральное Агентство предпринимает шаги по пересмотру Российских нормативных документов. Этот пересмотр затронет, в основном, терминологию и приведет к снижению степени обязательности некоторых стандартов.

1.5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ, ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Решение задачи обеспечения единства измерений невозможно без метрологического надзора за установлением норм на метрологические характеристики средств измерений при их разработке и за сохранностью метрологических характеристик средств измерений при их производстве, транспортировании, хранении и применении.

Общие рекомендации на этот счет приведены в международном документе № 16 МОЗМ «Принципы обеспечения метрологического управления» («Principles of assurance of metrological control». — OIML, Paris, France). На рис. 1.8 приведена структурная схема, иллюстрирующая эти принципы, которые в полной мере соответствуют отечественной системе метрологического мониторинга разработки, испытаний, транспортирования, хранения и применения средств измерений. Эта система формировалась в соответствии с развитием отечественного приборостроения и метрологии и поддерживается традициями, законодательными актами, стандартами и иными нормативными документами Российской Федерации.

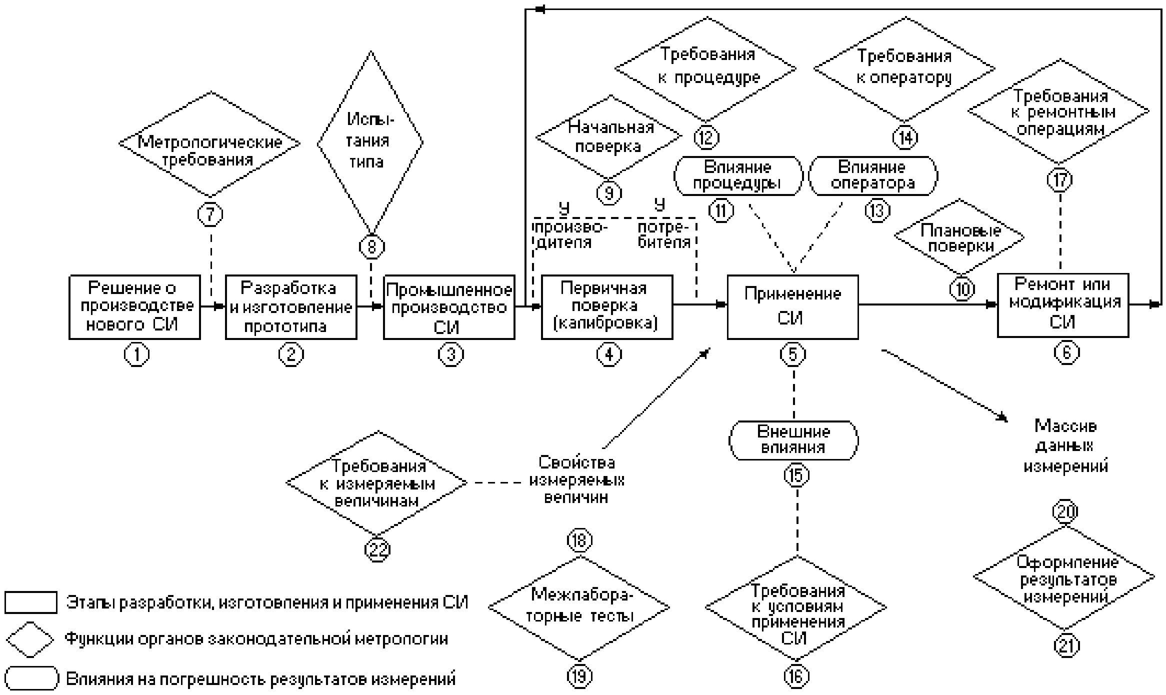

Рис. 1.8. Генеральная схема метрологического мониторинга средств измерений (по документу № 16 МОЗМ)

Ниже на рис. 1.9 приведена структурная схема этапов разработки, испытаний, производства и применения средств измерений, принятая в Российской Федерации. На этой схеме отдельные этапы обозначены цифрами. Ниже приводится расшифровка этих цифровых обозначений.

1. Составление технического задания (ТЗ) на разработку средства измерений.

В диалоге с заказчиком составляется перечень метрологических характеристик, на которые следует устанавливать нормы, превышение которых недопустимо, и устанавливаются численные значения этих норм. Эта процедура именуется *нормированием метрологических характеристик*. Должны быть учтены следующие обстоятельства:

- принцип действия и условия применения будущего средства измерений,
- требования стандарта ГОСТ 8.513 [7],
- требования стандартов ГОСТ 8.009 [3] и ГОСТ 8.256 [6],
- при разработке ИИС — требования стандарта ГОСТ 8.596 [8],
- если заказчик настаивает на нормировании таких метрологических характеристик, для контроля которых при калибровке или поверке рабочие эталоны отсутствуют, то в соответствии с действующими правилами эти эталоны также должны быть разработаны за счет средств заказчика.

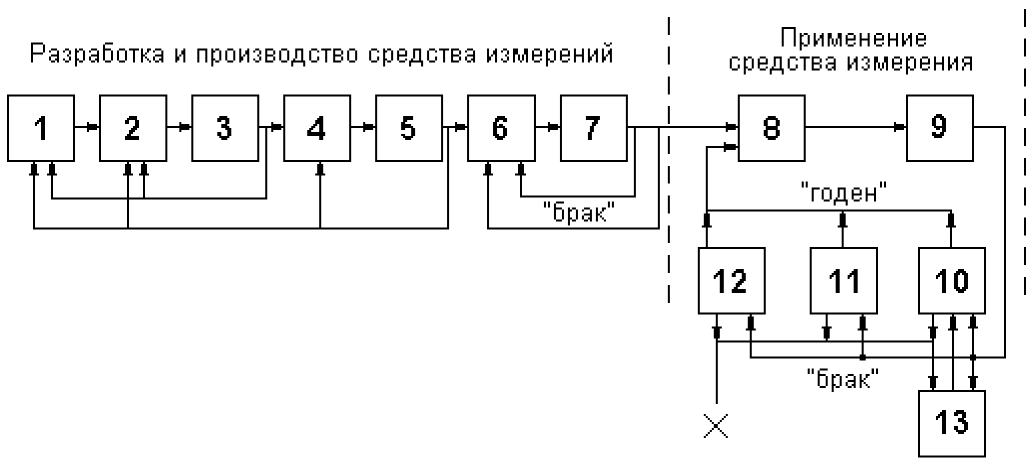

Рис. 1.9. Этапы разработки, производства, применения и метрологического контроля средств измерений

В соответствии с ГОСТ 8.395 [9] устанавливаются нормальные условия путем указания *нормальной области значений* всех влияющих величин.

При необходимости проводится метрологическая экспертиза ТЗ.

Примерное содержание технического задания на изделие приведено в приложении 2.

2. Разработка средства измерений в соответствии с ТЗ.

Выполняется разработка аппаратной части и программного обеспечения средства измерений. При разработке аппаратной части выполняется макетирование отдельных узлов и испытания макетов с помощью подходящих средств измерений.

Если в состав средства измерений входит компьютер, или микропроцессор или иное программируемое вычислительное устройство, то разработка программного обеспечения (далее ПО) средства измерений должна быть выполнена так, чтобы обеспечить не только защиту от преднамеренных и непреднамеренных искажений, но простой контроль такой защищенности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.654 [10], а также сопровождающих документов Р 50.2.077 [11] и МИ 3286 [12]. С целью удовлетворения этих требований разработчики программного обеспечения средства измерений должны, в основном, обеспечить:

защиту ПО от несанкционированного редактирования,

разделение ПО на *метрологически значимую* и метрологически незначимую части (при необходимости),

метрологическую аттестацию метрологически значимой части ПО,

идентификацию программного обеспечения, вычисление контрольной суммы при запуске ПО или по требованию контролирующего органа,

подлинность и целостность сохраняемых данных, которые должны содержать, как минимум, результаты измерений в единицах величин, время измерений, сведения об использованных средствах измерений,

защиту обрабатываемой информации и данных от непреднамеренных или преднамеренных искажений, которые могут происходить из-за некорректного программного исполнения или сбоев в работе операционной системы,

раздельный контроль интерфейсов связи с удаленными объектами и интерфейсов пользователя на предмет возможного несанкционированного вмешательства через эти интерфейсы,

отсутствие влияния ПО на метрологические характеристики ИИС,

обнаружение, отображение и(или) устранение сбоев и искажений, которые нарушают целостность ПО и данных.

Метрологически значимые части программного обеспечения — это программы и программные модули, выполняющие функции сбора, передачи, обработки, хранения и представления измерительной информации (определение, регламентироанное ГОСТ Р 8.654 [10]).

Метрологически значимые части ПО следует готовить пригодными к выполнению метрологической аттестации в соответствии с МИ 2955 [13] и МИ 2174 [14]. Наилучшей подготовкой программ вычислений к метрологическому анализу и метрологической аттестации является снабжение метрологически значимых программ внутренними программами оценки характеристик погрешности каждого результата вычислений так, чтобы каждый результат содержал в себе не только результат вычисления, но и характеристику его погрешности, например, в виде интервала. Впервые такой подход к метрологическому автосопровождению программ впервые был регламентирован ГОСТ 26.203 и в настоящее время успешно развивается (см. также разд. 3.10)

3. Заводские (лабораторные) испытания макета средства измерений и рабочего эталона, если таковой разрабатывается.

Проверяются возможности удовлетворения требованиям ТЗ, с каковой целью должны использоваться средства и методики, эквивалентные рабочим эталонам в отношении характеристик погрешности.

При отрицательных результатах — возврат к этапу **2.** или, в крайнем случае, — к этапу **1** с целью пересмотра по согласованию с заказчиком требований ТЗ.

4. Изготовление опытного образца, одного или нескольких экземпляров. Разработка проекта технических условий (ТУ). Обязательным разделом технических условий или обязательным отдельным документом, разрабатываемым на данном этапе, является «Методика поверки» или «Методика калибровки» средства измерений. Выполняется предварительный расчет метрологической надежности средства измерений, необходимый для назначения длительности интервала между периодическими поверками (первичного *межповерочного интервала*).

Если средство измерений снабжено программным обеспечением (ПО), то на этапе 4 проводятся предварительные испытания ПО с целью проверки его защиты от преднамеренных и непреднамеренных искажений, а также с целью его метрологической аттестации в соответствии с нормативными документами, перечисленными при описании этапа **2**. По результатам этих испытаний составляется предварительный протокол.

Проект раздела ТУ или документа «Методика поверки» разрабатывается в тех случаях, когда средство измерений подлежит государственному метрологическому контролю и надзору и(или) подлежит процедуре утверждения типа и занесению в государственный реестр средств измерений. Стандартная форма раздела или документа «Методика поверки (калибровки)» приведена в приложении 2.

Раздел ТУ или документ «Методика калибровки» разрабатывается в остальных случаях. Положительный результат калибровки не дает права на утверждение типа.

Эти документы при их утверждении являются основными при решении споров между заказчиком и исполнителями (разработчиком и производителем средства измерений). Следует учитывать:

- требования ГОСТ 8.513 [7],
- требования ГОСТ 8.395 [9],
- требования МИ 2174 [14],
- если разрабатывается ИИС, — требования ГОСТ 8.596 [8].

5. Приемочные испытания.

Если разрабатывается средство измерений специального назначения только для внутреннего использования на предприятии заказчика, эти испытания носят межведомственный характер, и тогда метрологическая часть испытаний выполняется в соответствии с «Методикой калибровки». В приемочной комиссии должны быть представлены: заказчик, при необходимости — ведомство заказчика, предприятие-разработчик и предприятие — потенциальный изготовитель.

Если разрабатывается средство измерений широкого назначения, подлежащее обязательному государственному метрологическому надзору и контролю и предназначенное для утверждения типа и занесения в государственный реестр средств измерений, испытания выполняются государственными научными метрологическими центрами. Метрологическая часть испытаний выполняется в соответствии с «Методикой поверки». Члены комиссии: представитель органа государственной метрологической службы — в качестве председателя комиссии, представитель предприятия-разработчика — заместитель председателя, представители предприятия — потенциального изготовителя, а также представители иных организаций и предприятий по требованию органа, проводящего испытания.

На испытания предъявляются:

- техническое задание на разработку,
- проект программы испытаний,

- проект ТУ с проектом документа «Методика поверки», если соответствующий раздел в ТУ отсутствует,

- проект эксплуатационных документов,

- опытные образцы разработанного средства измерений в установленном количестве,

- протокол предварительных заводских (лабораторных) испытаний,

- предложение по установлению длительности межповерочного интервала (см. также этапы **4** и **10**),

- все перечисленное для рабочего эталона, необходимого для поверки средства измерений, если он разрабатывался.

При необходимости выполнять *поэлементную поверку* (*калибровку*) на испытания предъявляются (см. также разд. 1.5):

- комплект документов на отдельные средства измерений, из которых состоит составное средство измерений, содержащие сведения об их метрологических характеристиках,

- методика расчета метрологических характеристик составного средства измерений по известным метрологическим характеристикам отдельных его компонентов (расчет характеристик погрешности см. в разд. 2.6).

В этом случае выполняется экспериментальная проверка методики расчета.

Если штатная работа средства измерений выполняется с участием программного обеспечения, то на испытания должны быть предъявлены следующие характеристики ПО, соответствующие нормативным документам, перечисленным при описании этапа **2:**

- наименование ПО,

- идентификационное наименование ПО,

- номер версии (идентификационный номер) ПО,

- цифровой идентификатор ПО (контрольная сумма исполняемого кода),

- алгоритм вычисления идентификатора ПО (например, MD 5, CRC 12),
- протокол предварительных испытаний по определению идентификационных данных ПО, уровня защиты ПО от непреднамеренных и преднамеренных изменений, оценка влияния ПО на метрологические характеристики СИ.

Выполняются следующие испытания ПО:

1. Проверка отсутствия недопустимого влияния на метрологически значимую часть ПО и результаты измерений, осуществляемого через интерфейс пользователя.
2. Проверка отсутствия недопустимого влияния на метрологически значимую часть ПО и результаты измерений, осуществляемого через интерфейсы связи.
3. Проверка правильности взаимодействия между метрологически значимой и незначимой частями ПО.
4. Проверка защиты метрологически значимой части ПО и измеренных данных от случайных или непреднамеренных изменений.
5. Проверка защиты метрологически значимой части ПО и измеренных данных от преднамеренных изменений.
6. Проверка наличия таких средств защиты, как пломбирование, аппаратная блокировка, пароль, предотвращающие доступ через оптический порт и разъемы USB и Ethernet.
7. Проверка наличия журнала регистрации событий: число отключений питания, ошибочные нажатия на кнопки, и другая информация, связанная с неверными действиями.

При положительном результате испытаний, если целью этих испытаний было утверждение типа, выдается сертификат об утверждении типа средства измерений, утверждается ТУ и документ «Методика поверки», если он выполнен отдельно от ТУ, устанавливается длительность интервала между периодическими поверками, средство измерений заносится в государственный реестр средств измерений, разрешенных к применению на территории Российской федерации. Процедура утверждения, согласования и регистрации ТУ регламентирована ГОСТ Р 1.3 [15].

При отрицательном исходе испытаний возможны варианты решений:

- признать разработку бесперспективной,
- вернуть все материалы на доработку на один из этапов, показанных на схеме рис. 1.9.

6. Производство и выпуск средства измерений.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем:

- оснащения технологического процесса необходимыми средствами измерений, путем надзора и контроля над состоянием этих средств измерений,
- метрологической экспертизы технологической документации,

7. Выходной контроль при выпуске из производства.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем организации и выполнения выходного метрологического контроля в соответствии с разделом ТУ или отдельным документом «Методика поверки (калибровки)», утвержденным на этапе **5**.

При отрицательном результате — возврат на производство (рис. 1.9).

8. Входной контроль средств измерений пользователем или оптовым покупателем (дистрибьютором, торговой организацией) с целью предпродажной подготовки.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем:

- обеспечения необходимыми рабочими эталонами и другим необходимым оборудованием, путем надзора и контроля над состоянием рабочих эталонов,

- организации и выполнения входного метрологического контроля в соответствии с разделом ТУ или отдельным документом «Методика поверки (калибровки)», утвержденным на этапе **5**.

При отрицательном результате — предъявление рекламации изготовителю.

9. Применение средства измерений.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем:

- разработки методик выполнения измерений в соответствии с ГОСТ 8.563 [16] и МИ 2377 [17] с учетом рекомендации МИ 1967 [18],
- прогнозирования характеристик погрешностей результатов измерений, получаемых по этим методикам,
- выбора на основании этого прогноза подходящих средств измерений с учетом рекомендации МИ 1967-89 [18],
- оценки характеристик погрешностей результатов измерений.

10., **11.**, **12.** Операции надзора за метрологическим состоянием средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняются путем поверки или калибровки в соответствии с разделом ТУ или документом «Методика поверки (калибровки)» утвержденном на этапе **5**.

При отрицательном исходе любой из этих процедур средство измерений изымается из применения и может быть либо утилизировано, либо отправлено в ремонт.

10. *Периодическая поверка* (*калибровка*) — поверка (калибровка) средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные межповерочные интервалы времени.

При положительном исходе поверки (калибровки) на средство измерений наносится *поверительное клеймо* с указанием срока очередной периодической поверки и может быть составлен сертификат поверки.

Межповерочные интервалы устанавливают на этапе **5**. Длительность межповерочного интервала в зависимости от предварительно рассчитанных показателей метрологической надежности средства измерений может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет. В соответствии с документом № 10 МОЗМ «Руководящие указания по определению интервалов времени между переподтверждениями измерительного оборудования, применяемого в испытательных лабораториях» и отечественным документом РМГ 74-2004 [19] длительность межповерочного интервала может быть изменена с учетом результатов предыдущих периодических и иных поверок.

11. *Внеочередная поверка* (*калибровка*) — поверка (калибровка) средства измерений, проводимая до наступления срока его очередной периодической поверки.

Выполняется при замеченном ухудшении метрологических свойств средства измерений или при подозрении в этом, при нарушении условий эксплуатации, при повреждении поверительного клейма, после ремонта и (или) регулировки и т. п.

12. *Инспекционная поверка* — поверка, проводимая органом государственной метрологической службы на предприятии при увеличении брака продукции, при ухудшении производственной технологии путем проведении государственного надзора за состоянием и применением средства измерений на данном предприятии.

13. Ремонт или регулировка средства измерений.

После этого этапа средство измерений направляется на этап **8**.

1.6. РАЗНОВИДНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОВЕРКЕ (КАЛИБРОВКЕ) СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Применяются два метода комплектной поверки (калибровки): метод «*по мере*» и метод «*по образцовому прибору*». Второй из этих методов в метрологическом смысле более корректен.

Поверка (калибровка) средств измерений выполняется в нормальных условиях (в англоязычной литературе это *reference conditions*).

Вначале рассмотрим оба эти метода применительно к поверке (калибровке) измерительного прибора, то есть средства измерений, обладающего шкалой и индикатором, позволяющим оператору непосредственно воспринимать результат измерения. Для стрелочных приборов — это шкала с указателем, для цифрового прибора — цифровое табло. В обязательном нормативном документе «Методика (Инструкция по) поверки (калибровки)» задаются дискретные значения измеряемой величины $x_0, x_1, ..., x_j, ..., x_k$, при которых следует выполнить поверку. Обычно $k = (6 \div 11)$. Поскольку показания измерительного прибора y_j соответствуют значениям измеряемой величины x_j и выражаются в единицах ее измерения, то в идеальном случае, при отсутствии инструментальной погрешности должно быть: $y_j = x_j$ при всех $j = 1, 2, ..., k$. На рис. 1.10 показаны схемы экспериментов, реализующих методы поверки (калибровки) «по мере» и «по образцовому прибору».

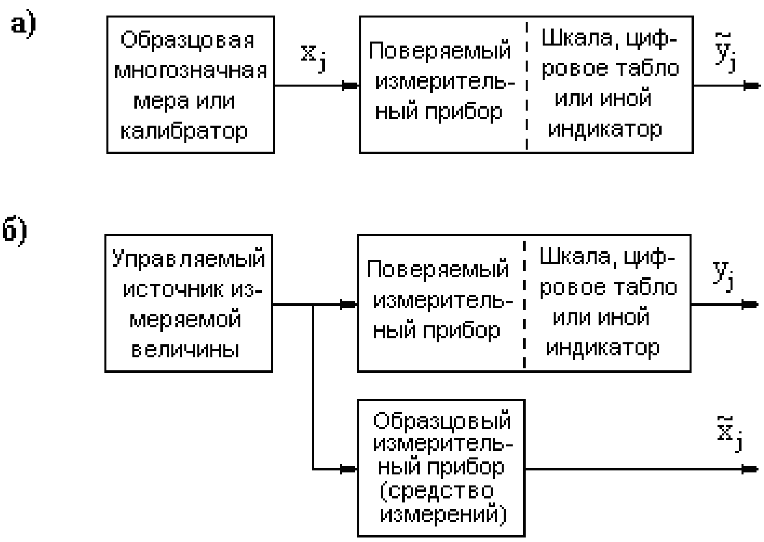

Рис. 1.10. Схемы поверки измерительного прибора:
а) методом «по мере»; *б)* методом «по образцовому прибору»

При поверке (калибровке) «по мере» на вход поверяемого прибора от многозначной меры или от калибратора последовательно подаются заданные значения измеряемой величины $x_0, x_1, ..., x_j, ..., x_k$. Погрешность измерения этих значений не должна превышать 1/5 ÷ 1/3 от ожидаемого предела допускаемой погрешности поверяемого прибора.

Если имеется подозрение на вариацию (гистерезис, сухое трение) поверяемого прибора, то эксперимент по поверке (калибровке) должен выполняться следующим образом.

Заданные значения измеряемой величины устанавливаются на входе поверяемого средства измерений вначале при их возрастании от минимального до максимального значения в диапазоне измерений (прямой ход), затем в обратном порядке — от максимального до минимального (обратный ход). При каждом установленном значении измеряемой величины вычисляют погрешность $\Delta y_j = \tilde{y}_j - x_j$, $j = 1, 2, ..., k$, где $\tilde{y}_j$ — показания поверяемого прибора.

Для выявления вариации (гистерезиса, сухого трения) изменение измеряемой величины и подход к заданному значению должны выполняться плавно, без перебросов: при прямом ходе — снизу, при обратном ходе — сверху. Чтобы вариация проявилась в крайней верхней точке диапазона, после достижения максимального значения x_k и фиксации результата ее измерения входную величину увеличивают на (10 ÷ 20) %, после чего вновь устанавливают x_k и продолжают эксперимент в обратной последовательности (обратный ход). При обратном ходе обеспечивается плавный подход к каждому заданному значению x_k сверху. Для выявления гистерезиса в крайней нижней точке диапазона поступают аналогично: после достижения минимального значения x_0 и фиксации результата ее измерения входную величину уменьшают, после чего вновь устанавливают x_0 и вновь регистрируют результат измерения этого значения. Так завершается один цикл измерений, состоящий из прямого и обратного хода.

При наличии у поверяемого прибора случайной погрешности выполняется *n* циклов измерений. Тогда при каждом значении x_j будет получено *2n* значений погрешности Δy_{ji}. Для вычисления характеристик погрешности эти значения обрабатываются статистическими методами.

Метод поверки (калибровки) «по мере» обладает одним недостатком. Дело в том, что погрешность многих приборов не превышает цены минимального деления шкалы (или цены младшего разряда выходного кода — у цифровых приборов). В отдельных случаях погрешность может достигать одного — двух значений цены минимального деления аналоговой или цифровой шкалы. В этих условиях погрешность отсчитывания значений погрешности Δy_{ji} (то есть их округление) может достигать 100 %, поэтому достоверность определения и контроля погрешностей будет низкой.

Метод поверки (калибровки) «по образцовому прибору» лишен этого недостатка.

Перед поверкой (калибровкой) по этому методу задаются значения результатов измерений $y_0, y_1, \dots, y_j, \dots, y_k$, при которых следует выполнить поверку (калибровку), и соответствующие значения входной величины $x_0, x_1, \dots, x_j, \dots, x_k$, называемые расчетными значениями. Эти значения указываются в методике (инструкции) по поверке. На вход испытуемого прибора значения измеряемой величины последовательно подаются от регулируемого, но стабильного источника. Регулировкой входной величины добиваются того, чтобы показания испытуемого прибора оказались в точности равными заданным значениям $y_0, y_1, \dots, y_j, \dots, y_k$. Добившись каждого из этих значений, измеряют входную величину образцовым прибором, цена деления шкалы которого, как минимум, в три раза меньше, чем у поверяемого. При получении каждого результата измерения, например, y_j оказывается, что это значение достигнуто при ином значении $\tilde{x}_j$, отличающемся от y_j. Пусть $\tilde{x}_j$ — показания образцового прибора. Тогда в каждой j-й точке абсолютная погрешность испытуемого прибора, приведенная к его входу, равна $\Delta x_j = y_j - \tilde{x}_j$, j = 1, 2, ... , k. Условия поверки (калибровки) — нормальные.

Количество циклов измерений, правила выполнения экспериментов и обработка результатов выполняются так же, как и при поверке (калибровке) «по мере». В результате будут получены значения характеристик погрешности, приведенной ко входу.

Поверка (калибровка) измерительного преобразователя (датчика, аналогового, аналого-цифрового, цифроаналогового преобразователя) отличается от поверки (калибровки) прибора в силу следующих причин:

- измерительный преобразователь не имеет шкалы или иного индикатора выходной величины,
- входная и выходная величины преобразователя неоднородны,
- измерительный преобразователь может иметь нелинейную номинальную функцию преобразования $y = f(x)$.

По этим причинам схемы экспериментов по поверке (калибровке) преобразователей будут отличаться от схем рис. 1.10 (см. рис. 1.11).

Для поверки (калибровки) измерительных преобразователей методом «по мере» в документе «Методика (Инструкция по) поверки (калибровки)» должны быть указаны две группы значений:

- значения входной величины $x_0, x_1, \ldots, x_j, \ldots, x_k$, которые должны последовательно задаваться мерой или калибратором,

- расчетные значения выходной величины y_j, вычисляемые по номинальной функции преобразования: $y_j = f\left(x_j\right)$ для каждого j = 0, 1, 2, ..., k.

Значения x_j плавно без перебросов устанавливаются поочередно сначала в сторону увеличения (прямой ход), затем, при подозрении о наличии вариации, после небольшого превышения x_k — в сторону уменьшения (обратный ход). При каждом установленном значении x_j вычисляются погрешности $\Delta y_j = \tilde{y}_j - y_j$, приведенные к выходу, где $\tilde{y}_j$ — результат измерения выходной величины образцовым средством измерения. Таким образом, выполняется один цикл измерений. Условия поверки — нормальные.

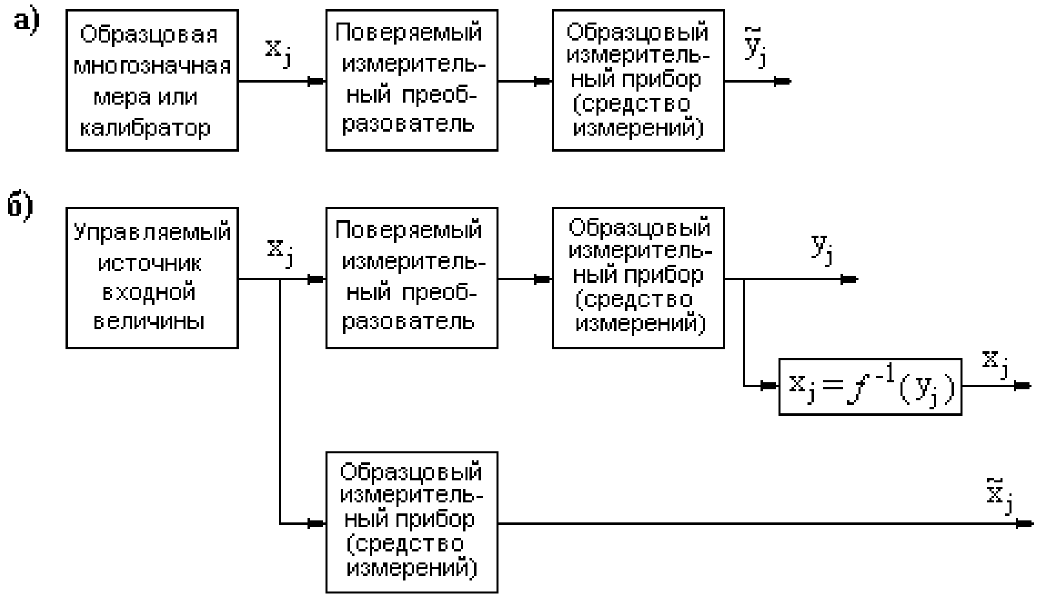

Рис. 1.11. Схемы поверки измерительного преобразователя:
а) методом «по мере»; *б)* методом «по образцовому прибору»

Как и ранее, если испытуемый преобразователь обладает случайной погрешностью, выполняется n циклов измерений, в результате которых при каждом j будут получены $2n$ значений погрешностей

Δy_{ji}, $i = 1, 2, ..., 2n$, приведенных к выходу поверяемого преобразователя. Все полученные значения погрешностей подвергаются обработке методами математической статистики.

Для поверки (калибровки) измерительного преобразователя методом «по образцовому прибору» в документе «Методика (Инструкция по) поверки (калибровки)» указываются две группы значений:

- значения выходного сигнала $y_0, y_1, \ldots, y_j, \ldots, y_k$, которые необходимо последовательно устанавливать на выходе преобразователя по показаниям образцового прибора или иного образцового средства измерений,
- значения входного сигнала x_j, именуемые расчетными значениями; эти значения суть решения уравнений $f(x_j) = y_j$, то есть $x_j = f^{-1}(y_j)$.

При подозрении о наличии вариации (гистерезиса, сухого трения) один цикл измерений состоит из экспериментов в прямом и обратном ходе.

Регулировка источника входной величины осуществляется с помощью управляемого источника величины. В этом случае при достижении выходным сигналом каждого из заданных значений y_j вычисляются погрешности, приведенные ко входу преобразователя:

$$\Delta x_j = x_j - \tilde{x}_j = f^{-1}(y_j) - \tilde{x}_j,$$

где $\tilde{x}_j$ — показания образцового прибора, $f^{-1}(y_j)$ — функция, обратная номинальной функции преобразования.

Как и ранее, при необходимости выполняется n циклов измерений, в результате которых при каждом j будут получены $2n$ значений погрешностей Δx_{ji}, $i = 1, 2, ..., 2n$.

При поверке (калибровке) измерительных преобразователей требования к точности образцовых средств измерений ужесточаются, а именно, погрешность, вносимая двумя образцовыми средствами измерений, участвующими в поверке (калибровке), в совокупности не должна превышать (1/5 ÷ 1/3) от предполагаемого предела допускаемой основной погрешности поверяемого (калибруемого) измерительного преобразователя.

Для поверки (калибровки) средств измерений должны применяться только такие образцовые средства измерений (рабочие меры), которые занесены в государственный реестр средств измерений, и они должны быть применены до окончания срока очередного межповерочного интервала. В приложении 2 приведена стандартная форма методики поверки (калибровки) средств измерений.

В последнее время процедуры поверки (калибровки) все чаще выполняются с применением компьютеров, которые имеют возможность управлять работой многозначных мер (калибраторов) и непосредственно воспринимать сигналы измеряемых величин и выходные сигналы измерительных преобразователей. В этой ситуации поверка (калибровка) выполняется автоматизировано и в соответствии с поверочной схемой общая погрешность измерений, выполняемых при поверке рабочими эталонами (калибратор, образцовые средства измерений, а также программы обработки данных) не должна превышать 1/3 ÷ 1/5 от ожидаемого предела допускаемой основной погрешности поверяемого (калибруемого) средства измерений.

Оба описанных метода поверки (калибровки) могут быть применены к таким средствам измерений, входной сигнал которых x может быть воспроизведен с помощью меры или стабилизированного источника, а выходной сигнал y может быть достаточно точно зарегистрирован с помощью образцового средства измерений. В метрологической практике подобного рода поверки (калибровки) имеют наибольшее распространение. Однако, если средство измерений представляет собой последовательное соединение измерительных преобразователей: датчика, фильтра, усилителя, коммутатора, аналого-цифрового преобразователя, то не всегда удается выполнить поверку (калибровку) всего комплекта соединенных таким образом средств. Чаще всего такая ситуация возникает при необходимости экспериментально определить или проконтролировать метрологические характеристики измерительных каналов измерительных информационных систем (ИИС), датчики которых вмонтированы в объект и не могут быть извлечены. Подобная ситуация возникает также при замене одного из преобразователей измерительного канала на другой (работающий взамен неисправного или на более совершенный). В такой ситуации ГОСТ 8.596 [8] позволяет отказаться от поверки (калибровки) всего комплекта измерительного канала (то есть от *комплектной поверки*) и разрешает выполнить *поэлементную поверку* (калибровку) измерительного канала.

Поэлементная поверка (калибровка) выполняется следующим образом.

Вначале все составные части средства измерений (например, измерительного канала) подвергаются по отдельности комплектной поверке (калибровке), и в их технической документации записываются их метрологические характеристики. Метрологические характеристики средства измерений, составленного из поверенных комплектно измерительных преобразователей (измерительного канала ИИС), определяются путем расчета по известным метрологическим характеристикам этих преобразователей. Для того, чтобы поэлементная поверка (калибровка) была допущена для исполнения, она должна быть экспериментально проверена и утверждена на приемочных испытаниях составного средства измерений (см. этап **5** раздела 1.5).

1.7. ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТИ

Результат измерения $\tilde{x}$ представляется именованным числом, выраженным в единицах измерения измеряемой величины x.

Характеристика абсолютной погрешности, равная разности между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины, то есть $\Delta x = \tilde{x} - x$ выражается именованным числом в единицах измерения измеряемой величины.

Характеристика относительной погрешности, то есть $\gamma = \Delta x / x$ (в том числе — приведенной $\gamma_{\text{прив}} = \Delta x / x_{\text{норм}}$) должна выражаться в процентах, $x_{\text{норм}}$ — нормирующее значение измеряемой величины, обычно это ширина диапазона измерения.

При измерениях, выполняемых с применением 32-разрядных современных средств вычислительной техники, результаты измерений и их погрешности предъявляются пользователю с избыточным количеством цифр. Количество цифр, представляющих в этих компьютерах числа с двойной точностью, вдвое больше. Это обстоятельство создает чисто визуальное представление о том, что измерения выполнены очень точно. Особенно ярко это проявляется при усреднении результатов многократных измерений.

Пусть, например, результат усреднения результатов измерений постоянного напряжения получен в виде 8,352487963 В,
а оценка предельной абсолютной погрешности 0,003567825 В.

Ясно, что в этом случае все цифры результата, находящиеся на третьем месте после запятой и далее, недостоверны, поскольку все они расположены внутри зоны погрешности, ограниченной первой значащей цифрой погрешности, находящейся также на третьем месте после запятой. Поэтому результат измерения следует округлить до того знака (разряда), в котором появилась первая значащая цифра погрешности. В данном случае это третий знак после запятой.

При этом, если старшая из отбрасываемых цифр равна 5 или больше, младшая цифра из оставшихся увеличивается на единицу, в противном случае она остается неизменной. Если результат измерения выражается целым числом, то отбрасываемые цифры заменяются нулями.

Поскольку погрешность результата измерений оценивается приближенно сверху предельным значением, число, выражающее абсолютную или относительную погрешность, бессмысленно представлять количеством значащих цифр, превышающим 2, тем более, что добросовестный производитель должен предоставлять пользователю определенные гарантии. Поэтому в соответствии с действующей нормативной документацией число, обозначающее предельное значение погрешности (неопределенности) результата, должно быть округлено в сторону увеличения до одной или максимум, двух значащих цифр, вторая из которых обычно равна 5.

Округление результата измерений и предельного значения погрешности следует выполнять только на последнем этапе вычислений при получении окончательных результатов.

В приведенном примере результат должен быть выражен числом

8,352 В,

а предельная абсолютная погрешность (неопределенность) этого результата — числом 0.004 В.

Если в результате измерения получено число 8,352687963 В, то он должен быть представлен в виде 8,353 В.

Правила представления интервальных характеристик. Если интервал симметричен относительно нуля, его границы могут быть представлены в виде $\pm\Delta$. Интервал с несимметричными границами следует представлять указанием обеих границ: $[A, B]$. Такое же представление пригодно для интервалов с симметричными границами: $[-A, A]$.

2. ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ПЕРЕЧНЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ НОРМИРОВАНИЯ

2.1. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ПЕРЕЧНЯ НОРМИРУЕМЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Нормирование метрологических характеристик выполняется на этапе **1** «составление технического задания» общей схемы этапов разработки средства измерений (см. разд. 1.5). На этом этапе следует руководствоваться стандартами ГОСТ 8.009 [3] и ГОСТ 8.256 [6], содержащими перечни значительного количества метрологических характеристик, из которых следует выбирать конкретные характеристики, специфические для каждого средства измерений. В начале этого стандарта приводятся следующие непременные требования к метрологическим характеристикам, подлежащим нормированию:

- нормируемые метрологические характеристики должны выбираться с учетом принципа действия и условий применения средства измерений,
- нормируемые метрологические характеристики должны обеспечивать расчет характеристик погрешности результатов прямых и косвенных измерений, выполняемых в рабочих условиях эксплуатации,
- нормируемые метрологические характеристики измерительных преобразователей должны обеспечивать расчет метрологических характеристик составного средства измерений, состоящего из последовательного соединения этих измерительных преобразователей, как это обычно имеет место, например, в измерительных каналах измерительных информационных систем (ИИС),

- нормируемые метрологические характеристики должны обеспечивать разумную технико-экономически обоснованную трудоемкость их экспериментального определения или контроля при поверках или калибровках.

Конкретные основания для выбора метрологических характеристик, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 8.009 [3], могут быть установлены в результате анализа

- возможных методов оценки характеристик погрешности результатов измерений в статическом и динамическом режиме,
- возможных методов расчета статических и динамических метрологических характеристик составного средства измерений, в том числе измерительного канала ИИС, по метрологическим характеристикам отдельных измерительных компонентов,
- возможных методов экспериментального определения статических и динамических метрологических характеристик средств измерений при их поверке (калибровке).

Такому анализу посвящены разделы 2.2 – 2.5 (оценке погрешности результатов измерений), 2.6 – 2.8 (расчету метрологических характеристик составного средства измерений). Результаты этого анализа являются основанием для выбора метрологических характеристик, подлежащих нормированию. В разделе 3 этот выбор осуществляется. Раздел 4 посвящен методам экспериментального определения и контроля статических и динамических метрологических характеристик.

Перед тем, как переходить к конкретному аналитическому материалу, сделаем несколько общих замечаний.

Все нормы для характеристик погрешности средств измерений устанавливаются, определяются и контролируются в нормальных условиях эксплуатации (в англоязычной технической литературе это *reference conditjons*). Для измерений в *статическом режиме* нормы устанавливаются в виде *характеристик основной погрешности* (*intrinsic error*), представляющих собой предельно допускаемые значения *абсолютной (absolute error), относительной (relative error) или приведенной* (*fiducial error*) *основной инструментальной* погрешности, нормируемой для нормальных условиях эксплуатации (*reference conditions*). Нормальные условия эксплуатации представляют собой ограниченную область в пространстве внешних влияющих величин, изменение которых может привести к увеличению погрешности сверх основной. Нормальные условия устанавливаются индивидуально для конкретного типа средств измерений с соответствии с ГОСТ 8.395 [8].

Обычно нормы для характеристик основной инструментальной погрешности средств измерений выражаются границами интервалов, симметричных относительно начала координат. Если инструментальная погрешность средства измерений содержит случайную составляющую, этому интервалу приписывают некоторую вероятность, которой в России в большинстве случаев придается значение 0,95. Кроме того при наличии случайной составляющей погрешности этот интервал может быть выбран симметричным относительно систематической погрешности средства измерений, но в этом случае придется нормировать систематическую погрешность отдельно.

Повторим здесь, что инструментальная погрешность, нормированная или определенная в нормальных условиях, является *основной погрешностью* средства измерений.

Для определения характеристик погрешности результатов измерений в рабочих условиях эксплуатации (в англоязычных документах это *normal conditions*) характеристик основной погрешности недостаточно. Для этих целей нормируются *дополнительные погрешности* (*complementary errors*), которые представляют собой увеличение основной инструментальной погрешности, вызванное отклонением условий эксплуатации от нормальных. Нормирование предельно допускаемой дополнительной погрешности в отечественных документах выполняется раздельно для каждой *влияющей величины* (температуры, давления, влажности, напряжения питания, солнечной радиации, солевого тумана, песчаной бури и т. д.) в долях (0,5 или 1,0) от основной погрешности.

Для определения источников погрешности результата измерений, для разделения погрешности результата измерений и средства измерений, а также для выбора метрологических характеристик, подлежащих нормированию, ниже рассмотрены метрологические структурные схемы прямых измерений в статическом и динамическом режимах, выполняемых линейными и нелинейными, аналоговыми и цифровыми средствами измерений.

2.2. ОБЩАЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

На рис. 2.1 приведена метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме для общего случая применения нелинейных средств измерений. Данная схема пригодна для анализа измерений, выполняемых аналоговыми средствами измерений.

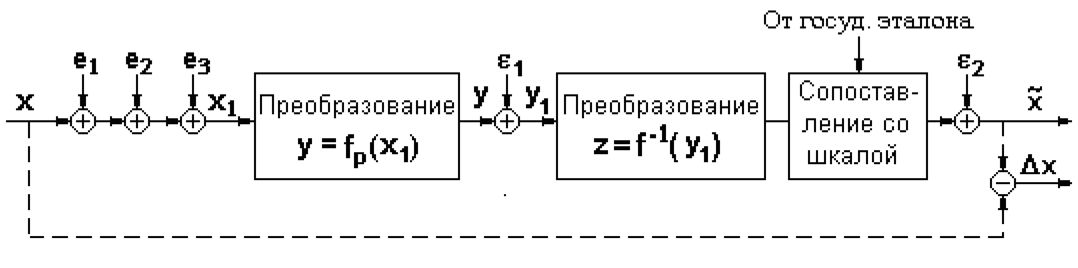

Рис. 2.1. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме

На рис. 2.1 обозначено:

x — истинное значение измеряемой величины,

e_1 — погрешность, вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям,

e_2 — погрешность, вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами,

e_3 — погрешность, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом,

$y = f_{\text{р}}(x)$ — реальная фактическая функция преобразования конкретного экземпляра средства измерения,

$y = f(x)$ — номинальная функция преобразования, декларированная для средств измерений данного типа,

$x = f^{-1}(y)$ — функция, обратная функции $y = f(x)$,

ε_1 — собственная погрешность преобразования средства измерения, вызванная дрейфом выходного сигнала преобразователя, собственными тепловыми шумами и помехами,

ε_2 — погрешность, состоящая из погрешности реализации обратной функции $x = f^{-1}(y)$, погрешности воспроизведения шкалы и погрешности сопоставления со шкалой, в том числе погрешности округления, выполняемого оператором при отсчете показаний аналогового прибора, или вызванного конечной разрядностью цифрового прибора или аналого-цифрового преобразователя,

$\tilde{x}$ — результат прямого измерения величины x,

Δx — погрешность результата измерения, $\Delta x = \tilde{x} - x$.

Погрешности e_1, e_2, e_3 возникают только тогда, когда средство измерений применяется по своему прямому назначению для выполнения измерений. Когда средство измерений не используется, эти погрешности отсутствуют и, значит, их невозможно считать погрешностями, свойственными средству измерений. Их невозможно определить или проконтролировать при поверке или калибровке, и поэтому норму на эти погрешности установить невозможно. Стало быть, ответственность за указанные погрешности несет не производитель средства измерений, а его потребитель. Изложенное дает нам основание использовать одно обозначение и одно наименование суммы этих погрешностей, а именно,

$e = e_1 + e_2 + e_3$ — *погрешность применения*.

Отметим важность одного из слагаемых этой суммы, а именно, погрешности от взаимодействия между средством измерения и объектом измерения e_3. Избежать этого взаимодействия не удается практически никогда, ибо добыча информации от объекта без взаимодействия невозможна.

Возникает естественное желание оценить погрешность, к которой приводит это взаимодействие. Простые примеры оценки этой погрешности приведены в приложении 1.

Различие между функциями $y = f_р(x)$ и $y = f(x)$ вызвано неточностью воспроизведения функции $y = f_р(x)$, из-за погрешностей изготовления и старения комплектующих изделий, из-за воздействия внешних влияющих факторов, а также из-за разброса на множестве экземпляров средств измерений. Разность между этими функциями обозначим, как $\Delta f(x) = f_р(x) - f(x)$. Эта разность случайна на множестве экземпляров средств измерений одного типа, и в целях обеспечения надлежащего метрологического качества должна быть ограничена пределами допускаемых различий $(-\Delta_f, +\Delta_f)$ между этими функциями для всех значений измеряемой величины из диапазона измерения:

$$\left| f_р(x) - f(x) \right| \le \Delta_f .$$

Это неравенство ограничивает область, в которой должны находиться функции преобразования всех средств измерений, признаваемых пригодными к применению. Пример такой области приведен на рис. 2.2.

На значение Δ_f устанавливается норма, которая должна быть указана в технической документации на средство измерений.

Естественными требованиями, предъявляемыми к функциям преобразования средств измерений, являются требования монотонности (а, следовательно, взаимной однозначности преобразования) и гладкости, то есть ограниченности модуля производных. Однако, с другой стороны, производная функции преобразования — это *чувствительность* средства измерений:

$$S = df_{\text{р}}(x)/\,dx \cong df(x)/\,dx\,, \tag{2.1}$$

которая не должна равняться нулю.

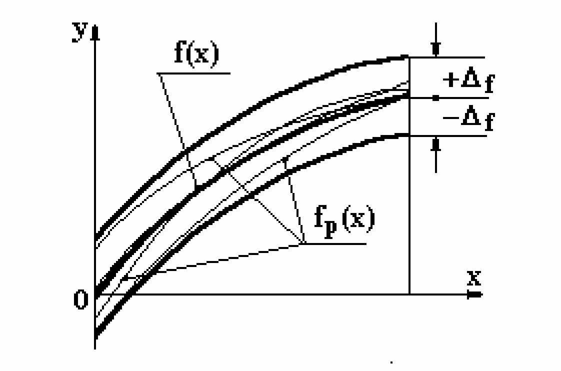

Рис. 2.2. Пример области допускаемого разброса функций преобразования средств измерений одного типа

Близость производных функций $y = f_{\text{р}}(x)$ и $y = f(x)$ можно выразить неравенством

$$\left|\frac{f'_{\text{р}}(x)}{f'(x)} - 1\right| \le \delta\,, \tag{2.2}$$

где значение $\delta > 0$ и имеет один порядок величины с собственной относительной погрешностью средства измерений.

Тогда, пользуясь схемой рис. 2.1, запишем выражение для абсолютной погрешности результата прямого измерения, выполняемого подобным средством:

$$\Delta x = f^{-1}\left(f_{\text{р}}(x+e) + \varepsilon_1\right) + \varepsilon_2 - x$$

и перегруппируем слагаемые:

$$f^{-1}\left(f_{\text{р}}(x+e)+\varepsilon_1\right)=\Delta x+x-\varepsilon_2 .$$

В силу монотонности функции *f(x)* это выражение равносильно следующему:

$$f_{\text{р}}(x+e)+\varepsilon_1 = f(x+\Delta x-\varepsilon_2),$$

Применим разложение функций в степенной ряд относительно точки **x** и, воспользовавшись малостью погрешностей, оставим только первые и линейные члены этих рядов. Тогда после перегруппировки слагаемых получим:

$$f'(x)\,\Delta x = f_{\text{р}}(x)- f(x)+ f_{\text{р}}'(x)e+ f'(x)\varepsilon_2+\varepsilon_1 .$$

Производная $f'(x)$ номинальной функции, то есть чувствительность средства измерений не должна быть равна нулю, поэтому мы имеем право разделить обе части последнего равенства на $f'(x)$:

$$\Delta x=\frac{\Delta f(x)}{f'(x)}+\varepsilon+e, \tag{2.3}$$

где $\varepsilon=\dfrac{\varepsilon_1}{f'(x)}+\varepsilon_2$ — собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений.

Первое и второе слагаемые, находящиеся в правой части равенства (2.3), порождены собственными свойствами средства измерений, поэтому сумма

$$\Delta_{\text{инст}}x=\frac{\Delta f(x)}{f'(x)}+\frac{\varepsilon_1}{f'(x)}+\varepsilon_2 \tag{2.4}$$

является *абсолютной инструментальной погрешностью* средства измерений. При выпуске средства измерений из производства, после его транспортирования, хранения и во время эксплуатации инструментальная погрешность не должна превышать (может быть, с какой-то вероятностью) некоторого установленного значения Δ то есть нормы, установленной для погрешности $\Delta_{\text{инст}}x$. Ответственность за непревышение инструментальной погрешностью этой нормы несет производитель средства измерений. Из равенства (2.4) следует, что норма Δ допускаемой инструментальной погрешности формируется вследствие двух необходимых ограничений:

- ограничения Δ_f на максимально допустимое отличие реальной функции преобразования от номинальной

$$\left|\frac{\Delta f(x)}{f'(x)}\right| = \left|\frac{f_{\text{р}}(x) - f(x)}{f'(x)}\right| \le \frac{\Delta_f}{|f'(x)|}, \tag{2.5}$$

- ограничения Δ_ε на максимально возможное значение аддитивной погрешности

$$|\varepsilon| = \left|\frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2\right| \le \Delta_\varepsilon. \tag{2.6}$$

Тогда $\Delta = \dfrac{\Delta_f}{|f'(x)|} + \Delta_\varepsilon$, и $\Delta_{\text{инст}} \in (-\Delta, +\Delta)$.

В рассмотренном общем случае удобно устанавливать норму $\gamma_{\text{отн}}$ на относительную инструментальную погрешность средства измерений или норму $\gamma_{\text{прив}}$ на приведенную погрешность, где нормирующим значением измеряемой величины служит наибольшее значение измеряемой величины в диапазоне измерения. Такие нормы именуются, как:

- *предел* $\gamma_{\text{отн}}$ *допускаемой основной относительной инструментальной погрешности*, и выражается в процентах:

$$\left|\frac{\Delta_{\text{инст}}x}{x}\right| 100\% \le \frac{\Delta}{x} 100\% = \frac{\Delta_f}{x\, f(x)} 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} 100\% = \gamma_{\text{отн}}, \tag{2.7}$$

- *предел* $\gamma_{\text{прив}}$ *допускаемой основной приведенной инструментальной погрешности* выражается также в процентах:

$$\left|\frac{\Delta_{\text{инст}}x}{x_{\max}}\right| 100\% \le \frac{\Delta}{x_{\max}} 100\% = \frac{\Delta_f}{x_{\max}\, f'(x)} 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\max}} 100\% = \gamma_{\text{прив}}. \tag{2.8}$$

Одна из перечисленных норм для инструментальной погрешности средства измерений, а именно норма Δ предельно допускаемой абсолютной погрешности, норма $\gamma_{\text{отн}}$ предельно допускаемой относительной погрешности и норма $\gamma_{\text{прив}}$ предельно допускаемой приведенной погрешности должна быть сообщена потребителю в технической документации в качестве метрологической характеристики, а именно характеристики погрешности средства измерений. Эта метрологическая характеристика устанавливается для всех экземпляров средств измерений одного типа. Гарантии в отношении сохранности этих характеристик обеспечивает изготовитель средства измерений и контролирующие метрологические органы.

Как следует из равенства (2.3), погрешность результата измерения превышает инструментальную погрешность на погрешность применения, ответственность за которую несет потребитель средства измерения. Если в конкретном случае значение погрешности применения можно оценить или если потребитель сможет установить хотя бы ограничение на погрешность применения в виде интервала $(-\Delta_e, +\Delta_e)$, где Δ_e — предельно возможное значение погрешности применения: $|e| \le \Delta_e$, то интервал возможных с вероятностью P значений погрешности результата измерения будет иметь границы $(-\Delta_x + \Delta_x)$, где $\Delta_x = (\Delta + \Delta_e)$. Тогда после однократного измерения, выполненного с помощью данного средства в нормальных условиях, об истинном значении измеряемой величины можно заключить, что с вероятностью P оно находится внутри интервала $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$, где $\tilde{x}$ — результат измерения.

По естественным причинам этот интервал назван в разд. 1.2.2 интервалом (остаточной) неопределенности истинного значения измеряемой величины, поскольку погрешность выполненного одиночного измерения, нормированная интервалом $(-\Delta_x, +\Delta_x)$, не позволяет исчерпать всю неопределенность значения измеряемой величины, имевшуюся до ее измерения.

Примечание автора. Здесь невозможно не отметить наметившуюся в последнее время тенденцию к неверной трактовке понятия *«неопределенность»* применительно к интервалу $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$. В недавно выпущенном стандарте ГОСТ Р 54500.1-2011 [20], который является калькоподобным переводом с английского языка международного документа «Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководство по неопределенности измерения», этот интервал именуется *неопределенностью,* несмотря на то, что неопределенность — это свойство, не имеющее количественного выражения (см. также разд. 1.2.2). Это недоразумение порождено тем, что в английском, французском, немецком, итальянском и испанском языках отсутствует понятие *«погрешность»* и для выражения погрешности в этих языках используется понятия: *error* (англ.), *Fehler* (нем.), *errore* (исп.), errore (ит.), *errore* (фр.). Точное значение каждого из этих терминов — *«ошибка»*. Разумные западные специалисты отметили несоответствие между понятием *«ошибка»* и той характеристикой неточности измерений, что желательно наименовать применительно к измерительным процедурам. Они не нашли ничего лучше, чем применить к выражению *«погрешность»* понятия *«uncertainty»* — неопределенность. И при выполненном калькоподобном переводе на русский язык это понятие было, к сожалению, сохранено.

2.3. ЧАСТНАЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Метрологическая схема измерений в этом случае существенно упрощается (см. рис. 2.3).

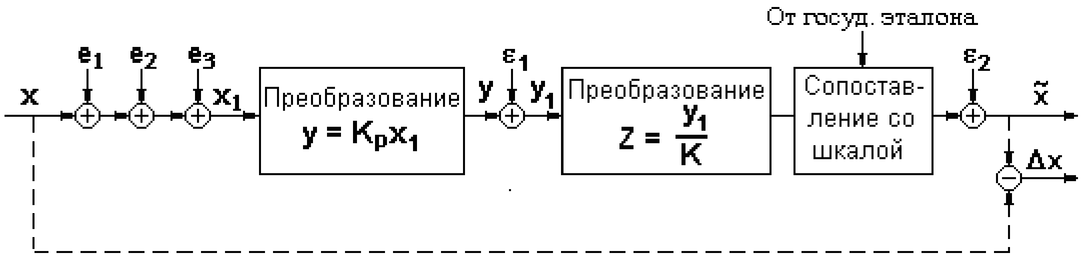

Рис. 2.3. Метрологическая структурная схема прямых измерений. Средство измерений линейное

Поскольку здесь $f_{\text{р}}(x)=K_{\text{р}}x$, $f(x) = K \cdot x$, $f'_{\text{р}}(x)=K_{\text{р}}$, $f'(x)=K$, $\Delta f(x)=f_{\text{р}}(x)-f(x)=K_{\text{р}}\,x-K\,x=\Delta K\,x$, выражение (2.3) для абсолютной погрешности результата измерений приобретает вид

$$\Delta x=\frac{\Delta K}{K}\,x+e+\varepsilon, \tag{2.9}$$

где $\Delta K=K_{\text{р}}-K$ — абсолютная погрешность коэффициента преобразования, вызванная разбросом его значений на множестве средств измерений данного типа, e — погрешность, возникающая при применении средства измерений,

ε — собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений (инструментальная абсолютная аддитивная погрешность):

$$\varepsilon=\frac{\varepsilon_1}{K}+\varepsilon_2\,.$$

Первое слагаемое равенства (2.9) линейно зависит от измеряемой величины и представляет собой произведение относительной погрешности коэффициента преобразования на значение измеряемой величины. Поэтому данная составляющая погрешности называется *мультипликативной составляющей погрешности* или *мультипликативной погрешностью*.

Второе и третье слагаемые не зависят от измеряемой величины, в сумме эти слагаемые образуют *аддитивную составляющую погрешности* или *аддитивную погрешность результата измерений*. Последнее из этих слагаемых по рождено собственными свойствами средства измерений, и это слагаемое является *аддитивной погрешностью средства измерений*. Точно так же исключительно свойствами средства измерений порождена мультипликативная составляющая погрешности (2.9). В связи с этим *инструментальная составляющая абсолютной погрешности* или *инструментальная погрешность* равна

$$\Delta_{\text{инст}} x = \frac{\Delta K}{K} x + \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \ . \tag{2.10}$$

Характеристикой разброса коэффициентов преобразования на множестве средств измерений одного типа является предельное допускаемое значение Δ_K, такое, что:

$$\left| K_{\text{р}} - K \right| = \left| \Delta K \right| \leq \Delta_K \ .$$

Предельное допускаемое значение аддитивной составляющей погрешности Δ_ε ограничивает сумму

$$\left| \varepsilon \right| = \left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon .$$

При выполнении этих условий разброс функций преобразования подобных средств измерений на множестве однотипных экземпляров будет иметь вид, показанный на рис. 2.4.

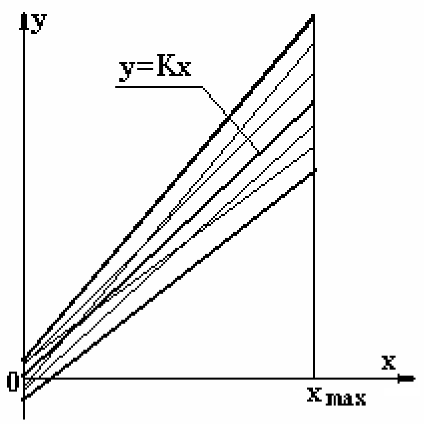

Рис. 2.4. Пример разброса функций преобразования линейных средств измерений

Как видно из рисунка, границами интервала погрешности будут расходящиеся прямые линии. В самом деле, используя обозначения предельных значений составляющих погрешности, получим линейное выражение для границ интервала $(-\Delta_x, +\Delta_x)$, содержащего (может быть, с некоторой вероятностью) значение абсолютной погрешности результата измерений:

$$\Delta_x \leq \frac{\Delta_K}{K} x + \Delta_e + \Delta_\varepsilon, \tag{2.11}$$

где Δ_ε — предельное значение аддитивной погрешности, Δ_e — предельное значение погрешности применения.

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах

$$(-\Delta_{\text{инст}}, +\Delta_{\text{инст}}),$$

где

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\Delta_K}{K} |x| + \Delta_\varepsilon. \tag{2.12}$$

Предельное значение γ_x относительной погрешности результата измерений выражается формулой

$$\left|\frac{\Delta x}{x}\right| \leq \gamma_x = \frac{\Delta_K}{K} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} + \frac{\Delta_e}{x}, \tag{2.13}$$

правая часть которой есть сумма предельно допускаемых относительных погрешностей коэффициента преобразования, аддитивной погрешности ε и погрешности применения e.

Здесь характеристика относительной мультипликативной составляющей уже не зависит от измеряемой величины и равна предельному значению относительной погрешности коэффициента преобразования $\gamma_K = \frac{\Delta_K}{K}$. Аддитивные составляющие содержат значение измеряемой величины в знаменателе, а это значит, что относительная погрешность результатов измерения увеличивается при уменьшении значений измеряемой величины.

Соответствующая область возможных значений абсолютной погрешности измерений показана в верхней части рис. 2.5, где x_{max} — верхний предел диапазона измерения.

Область возможных значений относительной погрешности результата измерения показана в нижней части рисунка.

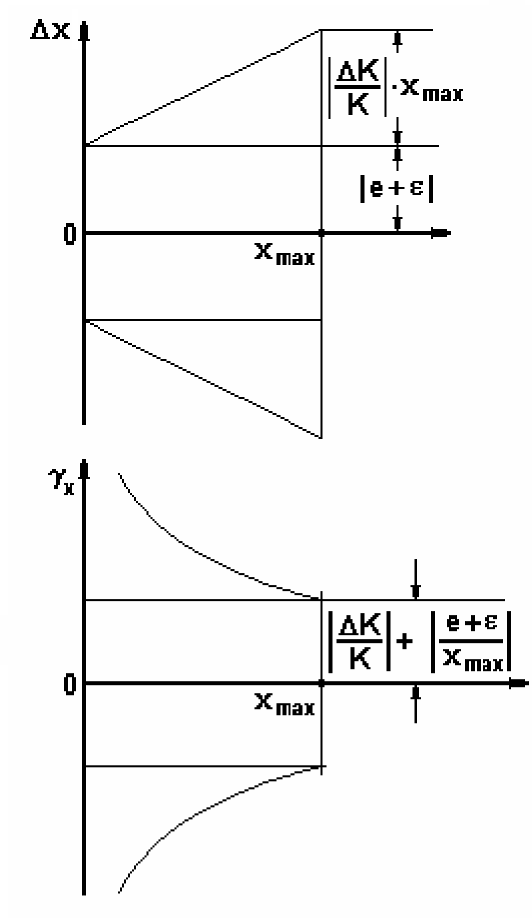

Рис. 2.5. Характеристики погрешности измерений

В рассмотренном случае оказывается удобным установить раздельные нормы на две составляющие инструментальной погрешности: на относительную погрешность коэффициента преобразования и на аддитивную составляющую погрешности средства измерений. Именно так нормируется инструментальная погрешность линейных средств измерений в зарубежной практике, а именно,

- норма γ_K устанавливается на относительную погрешность коэффициента преобразования в процентах (*gain error*):

$$\left|\frac{\Delta K}{K}\right| 100\% \leq \gamma_K, \tag{2.14}$$

- норма Δ_ε устанавливается на абсолютное значение аддитивной погрешности в единицах измеряемой величины (*offset error*):

$$\left|\frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2\right| \leq \Delta_\varepsilon. \tag{2.15}$$

В отечественной практике применяется иное нормирование инструментальной погрешности линейных средств измерений: нормируется относительная инструментальная погрешность средства измерений с помощью *двучленной формулы*:

$$\left|\frac{\Delta_{\text{инст}}}{x}\right| 100\% \leq c + d\left(\left|\frac{x_{\max}}{x}\right| - 1\right), \tag{2.16}$$

где $x_{\max}$ — максимальное значение измеряемой величины в диапазоне измерения, x — истинное значение измеряемой величины, на практике вместо него используется результат измерения,

$$d = \left|\frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\max}}\right| 100\%, \quad c = \left(\left|\frac{\Delta_K}{K}\right| 100\% + d\right). \tag{2.17}$$

На лицевой панели средства измерений и(или) в технической документации приводится либо двучленная формула, либо ее коэффициенты в виде *c/d,* где всегда $c \geq d$.

Раскрывая скобки в правой части (2.16) с учетом обозначений (2.17), получим ограничение, накладываемое этой формулой на относительную инструментальную погрешность средства измерений:

$$\left|\frac{\Delta_{\text{инст}}}{x}\right| 100\% \leq \left|\frac{\Delta K}{K}\right| 100\% + \left|\frac{\Delta_{\varepsilon}}{x}\right| 100\%,$$

что согласуется с (2.12). Сравнение зарубежных и отечественных методов нормирования показывает, что при отечественном нормировании пользователю предоставляется более наглядная и полная информация об инструментальной погрешности средства измерений.

2.4. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНЫХ АНАЛОГОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе будут рассмотрены метрологические структурные схемы измерений в динамическом режиме, когда изменение во времени измеряемой величины приводит к появлению погрешностей, существенных по сравнению с погрешностями измерения той же величины, не изменяющейся во времени в тех же условиях. Средство измерений линейное.

Преобразование изменяющихся во времени величин (далее — сигналов), выполняемое физическими устройствами, приводит к искажению формы сигналов вследствие того, что частотная характеристика любого физически реализуемого преобразователя неравномерна, а это означает, что коэффициенты преобразования различных гармонических составляющих входного сигнала различны. С увеличением частоты коэффициент преобразования в конечном итоге уменьшается вплоть до нуля. Во временной области процесс преобразования описывается интегральным оператором типа свертки, который при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$y(t)=\int_0^t k(t-\tau)x_1(\tau)d\tau, \tag{2.18}$$

где $k(t - \tau)$ является ядром оператора, а в теории измерений и в теории автоматического управления называется *импульсной переходной функцией* или *весовой функцией*.

С первого взгляда искажения, вызванные инерционностью измерительных преобразователей, можно было бы устранить хотя бы частично, решая интегральное уравнение (2.18) относительно измеряемого процесса $x_1(t)$, но эта задача является некорректной в математическом смысле и для ее решения необходимо предпринимать специальные непростые математические приемы. По этой причине рассмотрим вначале такой процесс прямых измерений, при котором обратное преобразование к размерности измеряемой величины выполняется путем простого деления сигнала измерительной информации на номинальный коэффициент K преобразования измеряемой величины в статическом режиме. Метрологическая структурная схема, отражающая описанный упрощенный режим измерения, представлена на рис. 2.6.

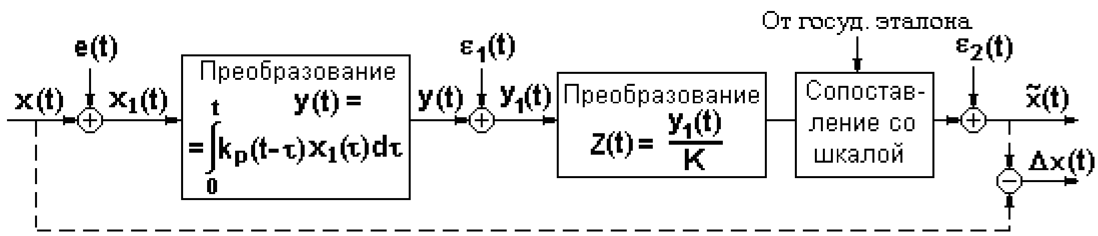

Рис. 2.6. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное аналоговое

а. *Упрощенный практически всегда применяемый режим измерений.* В структурной схеме рис. 2.6, соответствующей упрощенным измерениям в динамическом режиме, все обозначения за исключением обозначений динамических преобразований, использованы те же, что и обозначения, принятые ранее в разд. 2.3. Индекс ‘р’ у обозначения импульсной переходной функции означает, что в составе конкретного экземпляра средства измерений используется реальный преобразователь. Характеристики реальных преобразователей на множестве всех экземпляров имеют разброс, вызванный теми же причинами, которые перечислены выше в разд. 2.3. Отличие настоящей схемы от предыдущих состоит лишь в том, что в данной схеме все величины зависят от времени, а погрешности применения, действующие на входе средства измерений, обозначены единым символом $e(t)$. Сигнал, полученный в итоге первого преобразования, подвергается масштабированию с коэффициентом K. После этого выполняется сопоставление со шкалой и регистрация значений измеряемой величины на носителе информации (диаграммной ленте, фотопленке, магнитной пленке и т. п.) в единицах ее измерения. В ходе неизбежной расшифровки полученной непрерывной записи результатами измерений оказываются дискретные значения, а в состав погрешности ε_2 входит не только погрешность расшифровки, но и погрешность передачи единицы от государственного эталона (входит в состав погрешности расшифровки).

В соответствии с приведенной схемой погрешность прямого измерения мгновенных значений изменяющейся измеряемой величины может быть записана в виде равенства

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K}\left[\int_0^t k_{\text{р}}(t-\tau)x(\tau)d\tau\right] + \frac{1}{K}\int_0^t k_{\text{р}}(t-\tau)e(\tau)d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t) - x(t),$$

откуда

$$\Delta x(t)=\frac{1}{K}\left[\int_0^t k_{\text{р}}(t-\tau)x(\tau)d\tau-K\,\delta(t-\tau)x(\tau)d\tau\right]+\frac{\varepsilon_1(t)}{K}+\varepsilon_2(t)+\frac{1}{K}\int_0^t k_{\text{р}}(t-\tau)e(\tau)d\tau, \quad (2.19)$$

где $\delta(t-\tau)$ — дельта-функция, $\delta(0)=\infty$, на остальной оси равна 0, интеграл от нее равен 1, поэтому

$$x(t)=\int_0^t \delta(t-\tau)\,x(\tau)d\tau .$$

Применяя к равенству (2.19) преобразование Фурье, получим выражение для комплексного спектра погрешности измерения через спектры сигналов и реальную комплексную частотную характеристику преобразователя $K_{\text{р}}(j\omega)$:

$$\Delta x(j\omega)=\frac{1}{K}\left[K_{\text{р}}(j\omega)-K\right]x(j\omega)+\frac{\varepsilon_1(j\omega)}{K}+\varepsilon_2(j\omega)+\frac{K_{\text{р}}(j\omega)}{K}e(j\omega), \qquad (2.20)$$

где частотные характеристики суть преобразования Фурье соответствующих импульсных переходных характеристик:

$$K(j\omega)=\int_0^\infty k(t)e^{-j\omega t}dt\ , \qquad K_{\text{р}}(j\omega)=\int_0^\infty k_{\text{р}}(t)\,e^{-j\omega t}dt$$

Как видно, структура правой части равенств (2.19) и (2.20) аналогична структуре правых частей равенств (2.3), (2.4) разд. 2.2. Мало того, равенство (2.3) есть частный случай (2.19) и (2.20), поскольку при неизменной во времени измеряемой величине (или неизменном сигнале измерительной информации)

$$K(0)=\int_0^\infty k(t)dt=K\,,\quad K_{\text{р}}(0)=\int_0^\infty k_{\text{р}}(t)dt=K_{\text{Р}}\,,$$

$$\int_0^t k_{\text{р}}(t-\tau)xd\tau=K_{\text{р}}\,x, \qquad \int_0^t k_{\text{р}}(t-\tau)ed\tau=K_{\text{р}}e.$$

Первые три слагаемые в правой части каждого из равенств (2.19) и (2.20) представляют собой инструментальные погрешности, вызванные следующими причинами:

- отличием реального инерционного преобразования от идеального безинерционного, то есть такого, когда частотная характеристика практически не отличается от единицы, и тогда форма сигнала $x(t)$ не искажается,
- разбросом импульсных переходных характеристик и комплексных частотных характеристик на множестве экземпляров однотипных средств измерений и их нестабильностью,
- собственные аддитивные погрешности средства измерений, включая погрешности округления, шумы и погрешности передачи единицы измеряемой величины, возникающие при поверке средства измерения.

Первая из этих причин вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения мгновенных значений быстропеременных величин, если их спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя.

Последние слагаемые в формулах (2.19) и (2.20) своим происхождением обязаны погрешности применения, которая претерпевает то же преобразование, что и измеряемая величина, и если ее спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя, то она частично фильтруется.

Второе и третье слагаемые каждого из равенств (2.19) и (2.20) образуют в сумме собственную аддитивную абсолютную инструментальную погрешность средства измерений.

Получить точное выражение для характеристик погрешности результата измерения в динамическом режиме затруднительно как во временной, так и в частотной области, поскольку и в том и другом случае в выражениях (2.19) и (2.20) погрешность является процессом, существенно зависящим от изменяющегося сигнала измеряемой величины. Из-за сильно выраженной инерционности средства измерений основной вклад в погрешность результата вносит первое слагаемое, которое определяется двумя причинами: существенным отличием динамической характеристики $k_p(t - \tau)$ или $K_p(j\omega)$ от характеристики безинерционного преобразования $\delta(t-\tau)$ или K соответственно и неизвестным измеряемым сигналом $x(t)$ или его неизвестным спектром $x(j\omega)$. Надежда на то, что после измерения можно было бы применить ставший известным сигнал $\tilde{x}(t)$ или его спектр $\tilde{x}(j\omega)$, не слишком оправданы, поскольку, во-первых, они могут быть сильно искажены инерционностью средства измерений, и, во-вторых, очень неточная оценка характеристик погрешности может быть сделана только после завершения измерений. Простейшее конечное выражение для дисперсии погрешности измерений в динамическом режиме может быть получено только тогда, когда все процессы, участвующие в формуле (2.19), в том числе и сигнал измеряемой величины $x(t)$ являются стационарными эргодическими случайными процессами с нулевым средним.

В этом случае после окончания переходных процессов процесс изменения во времени погрешности $\Delta x(t)$ также будет стационарным зргодическим случайным процессом, и его спектральная плотность $S_{\Delta\Delta}(\omega)$ может быть выражена, как математическое ожидание квадрата модуля его спектра:

$$S_{\Delta\Delta}(\omega) = M[\Delta y(j\omega)\Delta y(-j\omega)].$$

Для упрощения вывода окончательного выражения будем считать, что все процессы, участвующие в формуле (2.19), по крайней мере, некоррелированы, и поэтому математические ожидания всех перекрестных произведений будут равны нулю. Тогда

$$S_{\Delta\Delta}(\omega) = M[\Delta y(j\omega)\Delta y(-j\omega)] = \frac{1}{K^2} M\left[\left|K_p(j\omega) - K\right|^2 \left|x(j\omega)\right|^2\right] +$$

$$+\frac{1}{K^2} M\left[\left|\varepsilon_1(j\omega)\right|^2\right] + M\left[\left|\varepsilon_2(j\omega)\right|^2\right] + \frac{1}{K^2} M\left[\left|K_p(j\omega)\right|^2 \left|e(j\omega)\right|^2\right]. \qquad (2.21)$$

Поскольку мы приняли, что случайные процессы $x(t), \varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), e(t)$ — стационарные эргодические, то математические ожидания квадратов модулей их спектров можно считать спектральными плотностями:

$$M\left[\left|x(j\omega)\right|^2\right]=S_{xx}(\omega), M\left[\left|\varepsilon_1(j\omega)\right|^2\right]=S_{\varepsilon\varepsilon 1}(\omega), M\left[\left|\varepsilon_2(j\omega)\right|^2\right]=S_{\varepsilon\varepsilon 2}(\omega),$$

$$M\left[\left|e(j\omega)\right|^2\right]=S_{ee}(\omega).$$

Кроме того модуль комплексной частотной характеристики — это амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) конкретного экземпляра средства измерений, то есть

$$\left|K_{\text{р}}(j\omega)\right|^2=A_{\text{р}}^2(\omega).$$

Квадрат модуля неслучайного сомножителя первого слагаемого в формуле (2.21) может быть преобразован следующим образом:

$$\left|K_{\text{р}}(j\omega)-K\right|^2=\left|K_{\text{р}}(j\omega)\right|^2+K^2-K\left[K_{\text{р}}(j\omega)+K_{\text{р}}(-j\omega)\right]=$$

$$=A_{\text{р}}^2(\omega)+K^2-2KA_{\text{р}}(\omega)cos\,\varphi_{\text{р}}(\omega)-2KA_{\text{р}}(\omega)+2KA_{\text{р}}(\omega)=$$

$$=\left(A_{\text{р}}(\omega)-K\right)^2+2KA_{\text{р}}(\omega)\left(1-cos\,\varphi_{\text{р}}(\omega)\right)=\left(A_{\text{р}}(\omega)-K\right)^2+4KA_{\text{р}}(\omega)sin^2\frac{\varphi_{\text{р}}(\omega)}{2},$$

где $\varphi_{\text{р}}(\omega)$ — реальная фазо-частотная характеристика (ФЧХ) средства измерений, которая в совокупности с АЧХ образуют комплексную частотную характеристику (КЧХ): $K_{\text{р}}(j\omega)=A_{\text{р}}(\omega)\,e^{j\varphi_{\text{р}}(\omega)}$.

После введенных обозначений и выполненных преобразований формула (2.21) получает вид

$$S_{\Delta\Delta}(\omega)=\frac{1}{K^2}\left(A_{\text{р}}(\omega)-K\right)^2S_{xx}(\omega)+\left(\frac{4KA_{\text{р}}(\omega)}{K^2}sin^2\frac{\varphi_p(\omega)}{2}\right)S_{xx}(\omega)+$$

$$+\frac{1}{K^2}S_{\varepsilon\varepsilon 1}(\omega)+S_{\varepsilon\varepsilon 2}(\omega)+\frac{\left|K_{\text{р}}\right|^2}{K^2}S_{ee}(\omega). \qquad (2.22)$$

Сейчас важно обратить внимание на то, что наше допущение о стационарности и эргодичности процессов, участвующих в формуле (2.19) может оказаться справедливым не для всех слагаемых этой формулы в равной степени. В большинстве реальных измерений процессы $x(t)$ и $e(t)$ стационарными и тем более эргодическими не являются. Больше всего это относится к погрешности применения, одна из составляющих которой, а именно погрешность от взаимодействия, как правило, систематическая. Это обстоятельство следует иметь в виду в каждом конкретном случае. В тех случаях, когда имеются достаточные основания для использования формулы (2.22) или отдельных ее слагаемых, можно вычислить дисперсию погрешности в динамическом режиме, интегрируя спектральную плотность:

$$\sigma_{\Delta}^{2} = 2\int_{0}^{\infty} S_{\Delta\Delta}(\omega)d\omega .$$

Имея в виду, что основной вклад в погрешность вносят первые два слагаемых, а также нормализацию случайных процессов при их прохождении через инерционные звенья, можно ориентировочно определить интервальную характеристику погрешности измерений в динамическом режиме с помощью квантилей нормального распределения, например для заданной вероятности 0.95 в качестве границ интервала неопределенности $(-\Delta, +\Delta)$ принять $\Delta = 2\sigma_{\Delta}$.

б. *Динамический режим измерений с обратным преобразованием.* Рассмотрим теперь метрологическую схему таких измерений в динамическом режиме, при которых с целью уменьшения погрешности измерения выполняется решение интегрального уравнения (2.18). Решение этого уравнения в математической физике относится к классу решения обратных задач, а здесь мы будем называть алгоритм решения этого уравнения *обратным преобразованием*. Метрологическая структурная схема, отражающая описанные действия, представлена на рис. 2.7.

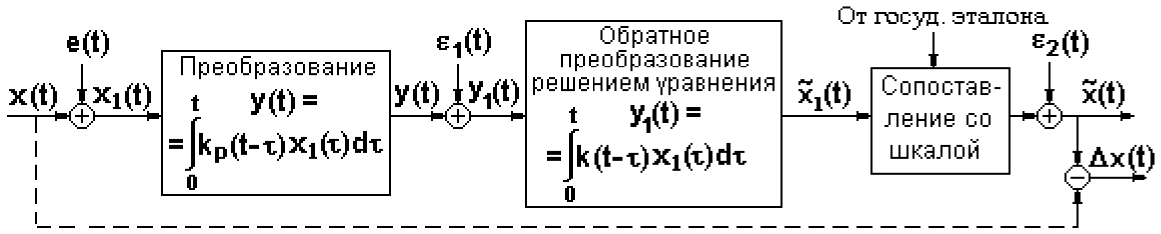

Рис. 2.7. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное аналоговое

Как видно из схемы рис. 2.7, в реальной ситуации приходится решать не уравнение (2.18), а аналогичное уравнение, у которого левая часть возмущена погрешностями $\varepsilon_1(t)$ и стоящая под интегралом импульсная переходная характеристика (ядро оператора) $k(t-\tau)$ является номинальной, то есть указана в технической документации, а потому отличается от неизвестной реальной характеристики $k_{\text{р}}(\text{t}-\tau)$, с которой и выполнено преобразование измеряемой величины, возмущенной погрешностью применения. Из высшей математики известно, что задача решения уравнения (2.18) даже с точными исходными данными является некорректно поставленной задачей. Это означает, что непрерывной зависимости абсолютно точного решения этого уравнения от левой части $y(t)$ не существует. На практике это означает, что даже при бесконечно малых изменениях $y(t)$ решение может изменяться как угодно много. В нашем случае погрешность $\varepsilon_1(t)$ не может быть малой. Кроме того преобразование измеряемой величины на первом этапе выполнялось с другой характеристикой $k_{\text{р}}(\text{t}-\tau)$, которая неизвестна, а решать уравнение нужно с номинальной известной характеристикой $k(t-\tau)$. Мало того, то решение, которое мы стремимся получить, будет отличаться от истинного сигнала измеряемой величины $x(t)$ на значение погрешности применения.

До 1963 года эти препятствия были непреодолимыми. В этом году Академик А. Н. Тихонов предложил отыскивать непрерывное решение этого уравнения путем незначительного целенаправленного изменения этого уравнения. Благодаря этому изменению может быть получено решение, довольно близкое к реализованному сигналу $x_1(t)$, но более гладкое. Такое решение называется регуляризованным. С тех пор было предложено значительное количество регуляризованных решений уравнений подобного рода. Большинство из этих решений являются апостериорными, то есть могут быть получены после того, как зафиксирован весь сигнал $y_1(t)$ целиком. В случаях измерений, выполняемых с целью управления технологическим оборудованием или транспортными средствами, такие методы не подходят, и нужно искать схемотехнические методы или цифровые фильтры, которые разумно было бы считать устройствами или методами *коррекции погрешностей* в динамическом режиме или в профессиональных кругах он называется методами или устройствами *коррекции динамических погрешностей* или *динамической коррекцией*. Наиболее просто можно реализовать коррекцию динамических погрешностей, возникающих при измерении мгновенных значений быстроизменяющихся процессов с помощью апериодических инерционных средств измерений первого порядка, моделью которых может служить интегрирующая *RC* – цепь. Таким средством измерений является, например, термопара или термопреобразователь сопротивления, заключенные в предохранительную массивную оболочку. Импульсная переходная характеристика таких датчиков существует только при положительных значениях времени и описывается затухающей экспонентой

$$k(t) = K\,exp\left(-\frac{t}{RC}\right), \qquad t \geq 0,$$

$RC = T$ — постоянная времени.

Преобразование Фурье этой характеристики — *комплексная частотная характеристика* датчика температуры:

$$K(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T} \ .$$

В этой ситуации в качестве аппаратного средства коррекции динамической погрешности (обратного преобразования) можно использовать усилитель с отрицательной обратной связью, в цепи которой реализуется интегрирующая *RC* – цепь. Это устройство может быть реализовано как схемотехнически (см. рис. 2.8) перед АЦП, так и с помощью цифрового фильтра после АЦП в компьютере. Комплексная частотная характеристика $K_{\text{обр}}$ такого средства есть

$$K_{\text{обр}}(j\omega)=\frac{K_0}{1+\dfrac{K_0}{1+j\omega T}}=\frac{K_0(1+j\omega T)}{K_0+1+j\omega T}.$$

Коэффициент усиления усилителя K_0 должен быть большим.

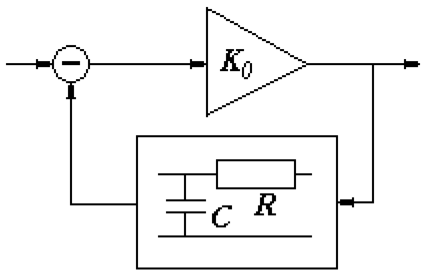

Рис. 2.8. Средство коррекции динамической погрешности первого порядка

Если в схеме рис. 2.7 погрешности $\varepsilon_1(t)$ отсутствуют, и реальная импульсная переходная характеристика средства измерений равна номинальной характеристике, то есть $k_{\text{р}}(t-\tau)=k(t-\tau)$, то обратное преобразование, осуществляемое приведенным средством, даст следующий результат измерения (преобразования), который мы запишем в частотной области, сделав предварительно преобразование Фурье:

$$\tilde{x}_1(j\omega)=K\frac{1}{1+j\omega T}K_{\text{обр}}(j\omega)x_1(j\omega)=K\frac{1}{(1+j\omega T)}\frac{K_0(1+j\omega T)}{(K_0+1+j\omega T)}x_1(j\omega)=$$

$$=K\frac{K_0}{K_0+1+j\omega T}x_1(j\omega)$$

Выноса из числителя дроби K_0, а из знаменателя K_0+1, получим:

$$x_1(j\omega) = K\frac{K_0}{K_0+1}\frac{1}{\left(1+j\omega\frac{T}{K_0+1}\right)}x_1(j\omega).$$

Мы видим, что постоянная времени последовательного соединения инерционного средства измерений уменьшилась в K_0+1 раз, а это означает, что уменьшилась инерционность преобразования сигнала $x_1(t)$. Правда, уменьшился также и коэффициент преобразования постоянной измеряемой величины, но при значительном коэффициенте усиления K_0 это уменьшение может быть сделано пренебрежимо малым. Кроме того этот измененный коэффициент преобразования будет записан в качестве номинального.

Понятно, что реальное наличие погрешностей изменит описанную оптимистическую ситуацию. Поэтому в реальных случаях приходится подбирать коэффициент усиления усилителя корректирующего средства опытным путем.

Материалы данного раздела указывают на необходимость нормирования и представления пользователю динамических характеристик средства измерений, желательно полных, перечисленных в разд. 3.3. Нормирование частных динамических характеристик, таких как нижняя и верхняя частоты частотного диапазона, время реакции и тому подобных (см. разд. 3.3) не позволит выполнить обратное преобразование сигнала измерительной информации и тем самым уменьшить погрешность измерений в динамическом режиме.

2.5. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Данная метрологическая структурная схема приведена на рис. 2.9 и отличается от предыдущих тем, что в цифровых средствах измерений осуществляется дискретизация непрерывно изменяющейся измеряемой величины, в результате чего может возникать погрешность, вызванная смещением моментов времени фактического измерения по отношению к заданным моментам t_i на Δt_i. Это обстоятельство отражено в метрологической структурной схеме посредством того, что в цепочке идеального преобразования, показанной пунктиром, представлена операция идеальной дискретизации, которая должна выполняться строго по расписанию, а именно, в моменты времени t_i. В цепочке реальных преобразований дискретизация выполняется в моменты времени t_i, смещенные на время Δt_i. Изложенное говорит о необходимости нормировать и показывать в технической документации интервал дискретизации или количество измерений, выполняемых АЦП или цифровым вольтметром в единицу времени.

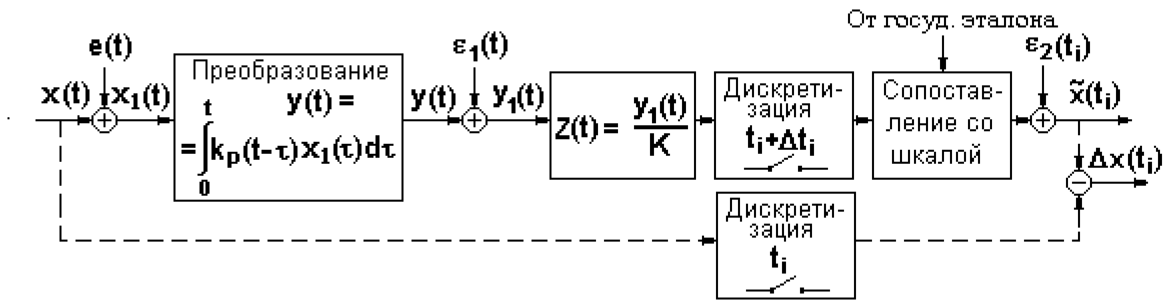

Рис. 2.9. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное цифровое

Смещение моментов дискретизации Δt_i есть не что иное, как *погрешность датирования отсчетов.* Эта погрешность порождается затратами времени на аналого-цифровое преобразование, то есть *длительностью цикла преобразования* и в общем случае она непостоянна и зависит от значения измеряемой величины. Несмотря на смещение моментов измерения относительно их расписания, результаты измерений регистрируются, как относящиеся к заданным моментам времени t_i, то есть расписанию. Но за время Δt_i значение измеряемой величины изменяется, в силу чего возникает погрешность измерения мгновенного значения изменяющейся величины, именуемая *апертурной погрешностью*. Эта погрешность должна учитываться в составе погрешности ε_2. Аналогичная погрешность возникает и при расшифровке аналоговых записей переменных во времени величин, и в этих случаях она входит в состав погрешности расшифровки, как это было отмечено в предыдущем пункте.

Апертурная погрешность равна нулю при измерении неизменных во времени величин. При необходимости измерять быстропеременные процессы апертурная погрешность аналого-цифрового преобразования может быть существенно снижена за счет применения перед АЦП специальных устройств, а именно, *устройств выборки-хранения* (УВХ).

В данном случае для погрешности измерений, как функции времени, применимо выражение (2.19), в котором следует все обозначения времени t снабдить индексом ‘ i ’. Выражение в частотной области получается применением к такому выражению *дискретного преобразования* Фурье.

Вторая особенность цифровых средств измерений заключается в том, что выходной величиной (для приборов — показанием) является число, которое представлено конечным числом разрядов, двоичных или десятичных. Поэтому реальная и номинальная функции преобразования цифровых измерительных приборов (выходной код — десятичный) может быть записана в виде

$$\tilde{N} = 10^{-n} Ent\left\lfloor f_{\text{р}}(x) 10^{n} \right\rfloor, \qquad N = 10^{-n} Ent\left\lfloor f(x) 10^{n} \right\rfloor. \qquad (2.23)$$

Функции преобразования аналого-цифровых преобразователей с двоичным выходным кодом имеют вид

$$\tilde{N} = 2^{-n} Ent\left\lfloor f_{\text{р}}(x) 2^{n} \right\rfloor, \qquad N = 2^{-n} Ent\left\lfloor f(x) 2^{n} \right\rfloor, \qquad (2.24)$$

где x — величина на входе средства измерений, N — выходной код (показание) цифрового средства измерений, n — целое число, $Ent[\bullet]$— операция выделения целой части числа '•'.

В результате функции преобразования цифровых средств измерений имеют ступенчатый характер и, строго говоря, никогда не могут быть линейными. Тем не менее, характер зависимости выходного кода от входной величины именуют по характеру номинальной функции $f(x)$, которая участвует в выражениях (2.23) и (2.24). Наиболее распространенными являются линейные цифровые средства измерений, номинальная функция преобразования которых есть $N = 2^{-n} Ent\lfloor Kx2^n \rfloor$. В специальных случаях могут применяться квадратичные ($f(x) = Kx^2$) и логарифмические ($f(x) = K \log x$) цифровые средства измерений.

Примеры функций преобразования цифровых средств измерений приведены на рис. 2.10, на которых высота каждой ступени ΔN есть единица младшего разряда выходного кода, а длина ступеньки Δx — цена единицы младшего разряда выходного кода, которая выражается в единицах измеряемой величины.

Из этих рисунков видно, что помимо погрешности, возникающей из-за отличия $f_{\text{р}}(x)$ от $f(x)$, и собственной аддитивной погрешности в составе инструментальной погрешности цифровых средств измерений непременно присутствует погрешность округления, не превышающая значения цены младшего разряда выходного кода.

Три примера, показанные на рис. 18, демонстрируют три варианта расположения реальной ступенчатой функции преобразования по отношению к номинальной. Наиболее выгодным является показанное на рис. 2.10, *в*) размещение ступенчатой функции со сдвигом на половину цены деления младшего разряда.

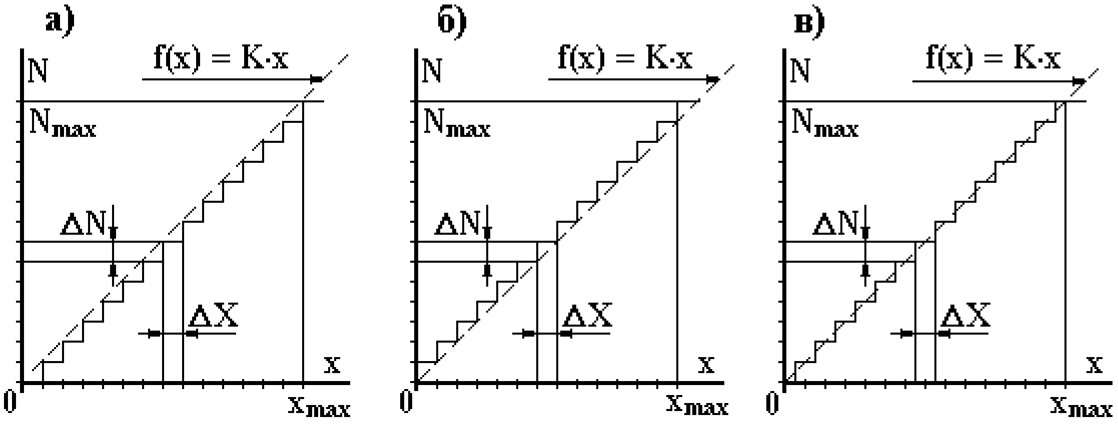

Рис. 2.10. Примеры функций преобразования цифровых измерительных приборов и АЦП

Функции преобразования цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) обратны функциям цифровых приборов и АЦП, но в отличие от них представляют собой набор точек, ибо входной код ЦАП может принимать только дискретные значения, отстоящие друг от друга на величину младшего разряда кода ΔN (см. рис. 2.11).

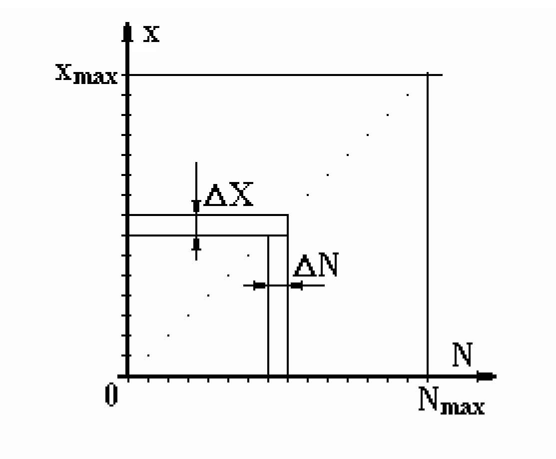

Рис. 2.11. Пример функции преобразования линейного ЦАП

Выходная аналоговая величина также может принимать только дискретные значения, номинальные расстояния между которыми Δx равно цене единицы младшего разряда входного кода. Цена единицы младшего разряда выражается в единицах выходной величины.

Показателем и характеристикой линейности цифровых измерительных приборов, АЦП и ЦАП является постоянство цены единицы младшего разряда кода (выходного или входного) во всем диапазоне измеряемых или воспроизводимых на выходе (у ЦАП) величин. В случаях, когда цена единицы младшего разряда не постоянна, это свойство называется *дифференциальной нелинейностью* и может нормироваться в специфических ситуациях. *Интегральная нелинейность* (то есть отличие функции $f(x)$ в (2.23) и (2.24) от линейной) также может нормироваться.

2.6. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Метрологическая модель последовательности аналогового преобразования измерительной информации строится с учетом современной модульной технологии создания измерительных информационных систем (ИИС) и измерительных подсистем АСУ ТП. Как показано в разд. 1.2.3 на рис. 1.4, 1.5, измерительные каналы подобных систем представляют собой последовательное соединение аналоговых и аналого-цифровых измерительных преобразователей, обладающих нормированными метрологическими характеристиками. Подобное соединение в свою очередь представляет собой составной преобразователь, метрологические характеристики которого должны быть определены на этапе проектирования составного средства измерений или при поэлементной поверке такого средства измерений расчетным путем по метрологическим характеристикам компонентов.

В настоящем разделе рассматривается частный случай метрологического анализа последовательного соединения линейных измерительных преобразователей в статическом режиме, а именно, расчет предела допускаемой относительной основной погрешности такого соединения по аналогичным характеристикам компонентов. С этой целью метрологическую модель составного аналогового измерительного преобразователя удобно представить в унифицированном виде, показанном на рис. 2.12, *а*, где через **ИП 1** и **ИП 2** обозначены унифицированные метрологические модели двух преобразователей, соединенных последовательно. Такой вид представления составного средства измерений удобен тем, что приведенный здесь расчет легко распространяется на соединение любого количества измерительных преобразователей. Схеме рис. 2.12, *а* соответствует более привычная схема рис. 2.12, *б*.

Здесь $K_{\text{р}1}, K_{\text{р}2}, K_1, K_2$ — реальные и номинальные коэффициенты преобразования первого и второго преобразователей, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — их собственные аддитивные погрешности, *е* с соответствующими индексами — погрешности, которыми отягощены физически существующие входные и выходные сигналы *у* по сравнению с идеальными сигналами *х*, не искаженными погрешностями.

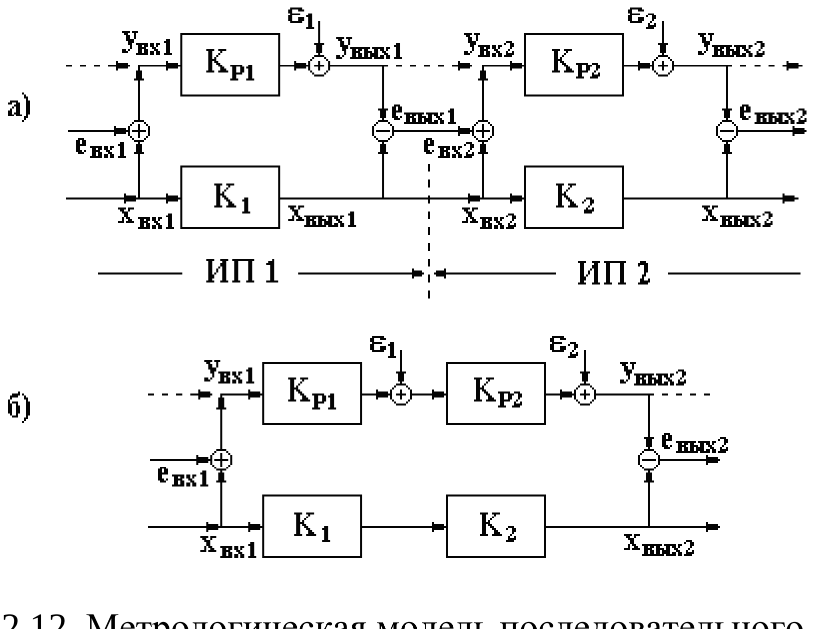

Рис. 2.12. Метрологическая модель последовательного соединения двух измерительных преобразователей

Здесь $K_{\text{р}1}, K_{\text{р}2}, K_1, K_2$ — реальные и номинальные коэффициенты преобразования первого и второго преобразователей, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — их собственные аддитивные погрешности, e с соответствующими индексами — погрешности, которыми отягощены физически существующие входные и выходные сигналы y по сравнению с идеальными сигналами x, не искаженными погрешностями.

Унифицированное формальное описание метрологической модели первого преобразователя имеет вид:

$$\begin{aligned} &y_{\text{вых}1} = K_{\text{р}1}\left(x_{\text{вх}1} + e_{\text{вх}1}\right) + \varepsilon_1 \\ &x_{\text{вых}1} = K_1 x_{\text{вх}1} \\ &e_{\text{вых}1} = K_{\text{р}1}\left(x_{\text{вх}1} + e_{\text{вх}1}\right) - K_1 x_{\text{вх}1} + \varepsilon_1 \end{aligned} \qquad (2.25)$$

Аналогично для второго преобразователя

$$\begin{aligned} &y_{\text{вых}2} = K_{\text{р}2}\left(x_{\text{вх}2} + e_{\text{вх}2}\right) + \varepsilon_2 \\ &x_{\text{вых}2} = K_2 x_{\text{вх}2} \\ &e_{\text{вых}2} = K_{\text{р}2}\left(x_{\text{вх}2} + e_{\text{вх}2}\right) - K_2 x_{\text{вх}2} + \varepsilon_2 \end{aligned} \qquad (2.26)$$

Очевидно, что $x_{\text{вх}2} = x_{\text{вых}1}$, $y_{\text{вх}2} = y_{\text{вых}1}$, $e_{\text{вх}2} = e_{\text{вых}1}$. Учитывая эти равенства, подставим (2.25) в (2.26) и для абсолютной погрешности на выходе второго компонента получим:

$$\begin{aligned} e_{\text{вых}2} &= K_{\text{р}2}\left(K_1 x_{\text{вх}1} + K_{\text{р}1}\left(x_{\text{вх}1} + e_{\text{вх}1}\right) - K_1 x_{\text{вх}1} + \varepsilon_1\right) - K_1 K_2 x_{\text{вх}1} + \varepsilon_2 = \\ &= \left(K_{\text{р}1} K_{\text{р}2} - K_1 K_2\right) \cdot x_{\text{вх}1} + K_{\text{р}2}\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + K_{\text{р}1} K_{\text{р}2} e_{\text{вх}1}. \end{aligned}$$

В результате получено выражение, которое легко может быть представлено в унифицированном виде для метрологической модели композиционного преобразователя, показанного на рис. 2.12, *б*. Сделаем следующие подстановки:

$$K_{\text{р}} = K_{\text{р}1} K_{\text{р}2}, \quad K = K_1 K_2, \quad \varepsilon = K_{\text{р}2}\varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

и разделим абсолютную погрешность на значение идеального выходного сигнала $x_{\text{вых}2} = K_1 K_2 x_{\text{вх}1}$. Тогда приведенная к выходу относительная погрешность преобразования измерительной информации, выполняемого композиционным преобразователем, выражается следующей формулой:

$$\gamma_{\text{вых}} = \frac{e_{\text{вых}}}{K_1 K_2 x_{\text{вх1}}} = \left(\frac{\Delta K_1}{K_1} + \frac{\Delta K_2}{K_2}\right) + \left(\frac{\varepsilon_1}{K_1 x_{\text{вх1}}} + \frac{\varepsilon_2}{K_1 K_2 x_{\text{вх1}}}\right) + \frac{e_{\text{вх1}}}{x_{\text{вх1}}}.$$

Первые два слагаемые, взятые в скобки, представляют собой инструментальную составляющую погрешности преобразования, которая равна сумме инструментальных составляющих погрешностей преобразования каждым из преобразователей. Поскольку коэффициенты двучленных формул относительной инструментальной погрешности каждого из преобразователей равны

$$c_1 = \frac{\Delta K_1}{K_1} + \frac{\varepsilon_1}{K_1 x_{вх1}}, \quad d_1 = \frac{\varepsilon_1}{K_1 x_{вх1}}, \quad c_2 = \frac{\Delta K_2}{K_2} + \frac{\varepsilon_2}{K_2 x_{вх2}}, \quad d_2 = \frac{\varepsilon_2}{K_2 x_{вх2}},$$

можем записать двучленную формулу по типу формулы (2.16) для погрешности композиционного преобразователя через коэффициенты c_1, d_1, c_2, d_2 двучленных формул, нормирующих характеристики погрешности каждого из преобразователей:

$$\gamma \le C + D\left(\left|\frac{x_{\max}}{x}\right| - 1\right),$$

где $C = c_1 + c_2, D = d_1 + d_2$, $x_{\max}$ — наибольшее (конечное) значение входной величины из нормированного диапазона.

Эта формула верна тогда, когда верхнее значение диапазона выходного сигнала предвключенного преобразователя равно верхнему значению диапазона входного сигнала послевключенного преобразователя, то есть, когда $x_{\max 2} = K_1 x_{\max 1}$ и $x_{\text{вх}2} = K_1 x_{\text{вх1}}$.

2.7. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Исчерпывающими динамическими характеристиками линейных средств измерений являются использованные в разд. 2.4 *полные динамические характеристики* (определения см. ГОСТ 8.009 [3], ГОСТ 8.256 [6]):

- импульсная переходная характеристика (весовая функция) $k(t)$, которая является откликом линейного измерительного преобразователя на входной сигнал в виде дельта-функции $\delta(t)$,

- комплексная частотная характеристика (КЧХ) $K(j\omega)$, которая есть преобразованием Фурье импульсной переходной характеристики $k(t)$,

- передаточная функция $K(p)$, которая есть преобразование Лапласа импульсной переходной характеристики,

- амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $A(\omega)=|K(j\omega)|$, которая есть зависящее от частоты ω отношение амплитуды синусоидального выходного сигнала к амплитуде действующего синусоидального входного сигнала,

- фазо-частотная характеристика (ФЧХ) $\varphi(\omega)$, которая есть зависящий от частоты ω фазовый сдвиг, который вносит измерительный преобразователь при преобразовании входного синусоидального сигнала.

Обозначим индексами 1 и 2 все перечисленные динамические характеристики в соответствии с их принадлежностью первому и второму соединенным измерительным преобразователям $\mathbf{ИП_1}$ и $\mathbf{ИП_2}$. Тогда при последовательном соединении этих двух преобразователей динамические характеристики такого составного преобразователя рассчитываются следующим образом:

- комплексная частотная характеристика:

$$K(j\omega)=K_1(j\omega)\,K_2(j\omega),$$

- передаточная функция:

$$K(p)=K_1(p)\,K_2(p),$$

- амплитудно-частотная характеристика:

$$A(\omega)=A_1(\omega)A_2(\omega),$$

- фазочастотная характеристика:

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega).$$

По свойствам преобразований Фурье и Лапласа если образы этих преобразований перемножаются, то прообразы претерпевают свертку, то есть

$$k(t) = \int_0^t k_1(t-\tau)\, k_2(\tau) d\tau.$$

Что касается *частных динамических характеристик*, таких, как постоянная времени, время отклика или верхняя частота частотной полосы, то при значительной разнице этих характеристик соединяемых преобразователей постоянная времени и время отклика составного преобразователя будут примерно равны наибольшей постоянной времени и наибольшему времени отклика, а верхняя частота составного преобразователя будет примерно равна минимальной верхней частоте одного из соединяемых преобразователей $\mathbf{ИП_1}$, $\mathbf{ИП_2}$. Если эти характеристики соединяемых преобразователей окажутся примерно одинаковыми, то ориентировочно можно считать, что постоянная времени и соответственно время отклика составного преобразователя увеличится примерно на 63 %, а верхняя частота так же уменьшится. Точные оценки частных динамических характеристик составного преобразователя могут быть рассчитаны только через полные характеристики. В этом состоит один из недостатков нормирования частных динамических характеристик. Тем не менее, чаще всего нормируются именно частные динамические характеристики, поскольку их экспериментальное определение и контроль значительно легче определения и контроля полных характеристик.

2.8. МОДЕЛЬ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ ФИЗИЧЕСКОМ СОЕДИНЕНИИ

Расчеты, приведенные выше в разд. 2.6, 2.7, строго говоря, справедливы в тех случаях, когда в месте соединения компонентов погрешность не возникает. Но в реальных системах это не всегда так. В месте соединения компонентов обычно возникают помехи, а также погрешность, вызванная несогласованностью входного и выходного сопротивлений. Для учета этих погрешностей в расчетах по разд. 2.6 следует предусматривать некоторый фиктивный, то есть физически не существующий соединительный компонент, который при метрологических расчетах должен восприниматься, как реальный, и иметь характеристики погрешности, форма нормирования которых не отличается от формы нормирования характеристик погрешности реальных преобразователей. При расчете по разд. 2.7 следует еще учитывать не только входное сопротивление постоянному току, но и выходной и выходной импедансы, которые имеют место у реальных измерительных преобразователей. Выходной импеданс чаще всего бывает индуктивным, а входной импеданс — чаще всего емкостным. Обычно характер этих импедансов сообщается пользователю вплоть до сообщений о величине емкости на входе и индуктивности на выходе. Для учета соотношения между выходным и входным импедансами полезно составить схему этого взаимодействия, записать получившуюся передаточную или комплексную частотную характеристики получившегося фиктивного компонента, который последовательно включено в состав общего преобразователя.

Эту технику мы сейчас разберем на простом примере фиктивного компонента для постоянных сигналов.

Структурная схема фиктивного соединительного компонента, моделирующего указанный эффект при передаче сигнала постоянным напряжением, приведена на рис. 2.13. Этот компонент имеет линейную характеристику, номинальный коэффициент преобразования K

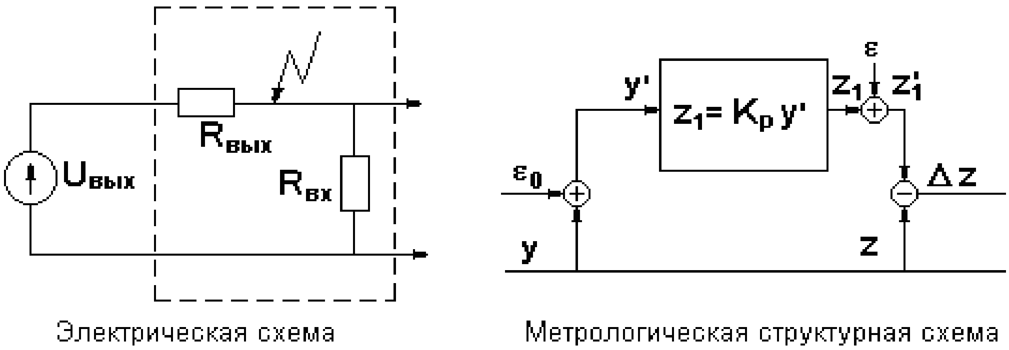

Рис. 2.13. Фиктивный соединительный компонент измерительного канала

равен 1, реальный коэффициент преобразования есть

$$K_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}}$$

В таком соединении возможны аддитивные погрешности ε, которые могут возникать из-за помех, наводок, тепловых шумов и других причин. Зная оценки интенсивности влияния этих параметров, можно составить двучленную формулу описания характеристики относительных погрешностей, которые порождаются указанными факторами. Если

$$|\varepsilon| < \Delta_{\varepsilon}, \Delta_K = \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}} - 1 = -\frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}}, \frac{\Delta K}{K_{\text{р}}} = -\frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}}},$$

то коэффициенты двучленной формулы

$$d = \frac{\Delta_{\varepsilon}}{y_{\max}} 100\%, \quad c = \left(\left| \frac{\Delta_K}{K} \right| 100\% + d \right) = \left(\frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}}} 100\% + d \right).$$

Введенная таким образом характеристика относительной погрешности фиктивного компонента позволяет выполнять расчет метрологических характеристик последовательного соединения линейных измерительных преобразователей с учетом их взаимного влияния непосредственно по формулам разд. 2.6, 2.7 без каких-либо изменений. Коэффициент c суммируется с коэффициентом C, коэффициент d суммируется с коэффициентом D. При наличии нескольких пар сопряжения преобразователей для каждого из них вычисляются коэффициенты двучленных формул и суммируются точно так же.

При передаче сигнала силой постоянного тока взаимодействие между соединяемыми преобразователями определяется только токами утечки. На погрешность преобразования это взаимодействие практически не влияет.

3. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ, ПОДЛЕЖАЩИЕ НОРМИРОВАНИЮ

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Анализ метрологических структурных схем и составных средств измерений, выполненный выше в разд. 2.2 – 2.5, свидетельствует о том, что инструментальная погрешность результатов измерений целиком определяется свойствами средств измерений, в основном, *метрологическими характеристиками*.

В стандарте ГОСТ 8.009-84 [3] приводится определение метрологических характеристик и их перечень, общий подход к выбору номенклатуры метрологических характеристик, а также способы установления норм на них и примеры применения.

Нормы на метрологические характеристики средств измерений устанавливаются с целью обеспечения гарантий их соблюдения и сохранности на момент приобретения средства измерений, в период их эксплуатации и хранения. В соответствии со стандартом ГОСТ 8.009 [3] эти нормы сообщаются пользователю в нормативных документах вида технических условий (ТУ) или технических описаний (ТО), а также в рекламной документации (выборочно) в виде пределов допускаемых значений метрологических характеристик. Гарантии сохранности метрологических характеристик обеспечиваются производителем и контролирующими государственными и ведомственными метрологическими органами путем метрологических испытаний средств измерений.

Метрологические характеристики делятся на следующие группы:

- характеристики погрешности средств измерений,

- характеристики преобразования сигналов измеряемых величин и сигналов измерительной информации,

- характеристики взаимодействия с объектом и внешними средствами измерений,

- прочие метрологические характеристики, то есть метрологические характеристики, которые в соответствии с ГОСТ 8.009 [3] при технической необходимости могут устанавливаться дополнительно сверх указанных в этом стандарте.

3.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для средств измерений нормируются характеристики основной и дополнительной погрешностей. Напомним, что основная погрешность — это погрешность средства измерений в нормальных условиях эксплуатации.

При отсутствии или пренебрежимой малости случайной составляющей погрешности устанавливается предел допускаемой основной погрешности, которая может быть представлена в виде абсолютной, либо относительной погрешности, либо как приведенная к некоторому *нормирующему значению* (*fiducial value*) измеряемой величины.

При наличии существенной случайной составляющей погрешности нормы на характеристики систематической и случайной составляющих устанавливаются раздельно:

- предел допускаемой систематической составляющей погрешности,

- предел допускаемого среднеквадратического значения случайной составляющей погрешности.

Допускается устанавливать характеристику погрешности, которая включает в себя обе составляющие: систематическую и случайную. Такой характеристикой является интервал, заданный нижней $\Delta_{\text{Н}}$ и верхней $\Delta_{\text{В}}$ границами, между которыми содержатся значения основной погрешности с вероятностью, не меньшей заданной вероятности P_0, равной обычно 0,8 ÷ 0,95, то есть:

$$\mathrm{P}(\Delta_{\text{Н}} \leq \Delta x \leq \Delta_{\text{В}}) \geq P_0.$$

Как правило, эти границы симметричны относительно нуля, то есть $\Delta_{\text{Н}} = - \Delta_{\text{В}}$.

При зависимости погрешности средства измерений от измеряемой величины нормы на характеристики погрешности могут быть выражены в виде функции или графика.

Нормы на характеристики дополнительной погрешности устанавливаются в виде пределов допускаемых *изменений* характеристик основной погрешности, вызванных отклонением влияющих величин от нормальных значений. Эти пределы указываются в долях (0,5 или 1,0) от основной погрешности по каждой из влияющих величин раздельно.

При незначительной дополнительной погрешности или по требованию пользователя вместо указания характеристик основной погрешности могут быть указаны характеристики погрешности средства измерений для расширенной области изменения влияющих величин вплоть до области, соответствующей рабочим условиям применения (в англоязычных документах для обозначения рабочих условий применения средств измерений используется термин «*normal conditions*»). В таких случаях указание характеристик дополнительной погрешности оказывается излишним. Но при этом следует иметь в виду, что экспериментальный контроль характеристик погрешности, установленных для рабочих условий, сильно усложняется, поскольку для этого придется искусственно создавать указанные условия путем контролируемого воспроизведения совместного действия влияющих величин в широкой области значений и в достаточном объеме, требующемся для размещения в нем средства измерений.

К характеристикам погрешности средств измерений относятся метрологические характеристики, отражающие погрешности отсчитывания результата измерения или его округления при представлении результатов измерений или значений физических величин в цифровом коде.

Такими метрологическими характеристиками являются:

- *цена наименьшего деления шкалы*,

- *цена младшего разряда выходного кода* АЦП или индикатора цифрового прибора,

- *значение наименьшей ступени физической величины*, которая воспроизводятся многозначными мерами, или величины, формируемой на выходе цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ И СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Эти характеристики нормируются для измерительных преобразователей. В документации на измерительный преобразователь должны быть указаны:

- *номинальная функция преобразования* (иначе — *номинальная статическая характеристика преобразования*) измеряемой величины $f(x)$,

- *динамические характеристики*, описывающие преобразование изменяющихся во времени сигналов измеряемой величины или сигналов измерительной информации.

Форма представления номинальных характеристик — функция, график или таблица. Если номинальная функция преобразования линейна и проходит через начало координат, указывается значение номинального коэффициента преобразования.

Пределы допускаемых отклонений реальной функции преобразования от номинальной не нормируются, поскольку нормами на эти отклонения, по сути дела, являются нормы, которые установлены на характеристики инструментальной погрешности.

Динамические характеристики указываются в документации на средства измерений, предназначенные для измерений в динамическом режиме или могущие быть использованными в таком режиме. Предельно допускаемый разброс динамических характеристик на множестве экземпляров средств измерений ограничивается посредством установления граничных динамических характеристик (верхней и нижней).

Примерами динамических характеристик (см. также разд. 2.4, 2.7) могут служить *импульсная переходная характеристика (весовая функция)* $k(t)$, переходная характеристика *и комплексная частотная характеристика* (КЧХ) $K(j\omega)$. Эти характеристики называются *полными динамическими характеристиками* и могут быть определены и нормированы только для линейных аналоговых средств измерений. Что касается частотных характеристик, то это следует из того, что для линейных средств измерений, которые в математической трактовке представляют собой линейные операторы $\mathbf{A}$, синусоидальные сигналы являются их собственными функциями, то есть при входном синусоидальном сигнале выходной сигнал также синусоидальный. Перечисленные характеристики взаимно-однозначно связаны (см. также разд. 2.4):

- КЧХ и импульсная переходная характеристика — преобразованием Фурье:

$$K(j\omega)=\int_0^{\infty} k(t)e^{-j\omega t}dt\ , \quad k(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega)\,e^{j\omega t}d\omega,$$

- переходная характеристика и импульсная переходная характеристика – интегрированием и дифференцированием:

$$H(t)=\int_0^{t} k(\tau)d\tau\ , \quad k(t)=\frac{dH(t)}{dt}.$$

Комплексная частотная характеристика (КЧХ), как и любая комплексная функция, может быть представлена двояко:

$$K(j\omega) = Re(\omega) + j\,Im(\omega) = A(\omega)\,e^{j\varphi(\omega)},$$

где $Re(\omega)$ — вещественная часть КЧХ, $Im(\omega)$ — мнимая часть КЧХ, $A(\omega)$ — *амплитудно-частотная характеристика* (АЧХ), $\varphi(\omega)$ — *фазочастотная характеристика* (ФЧХ).

Если теперь вернуться к математической трактовке линейных средств измерений, как реализации линейного оператора, то

$$\mathbf{A}\,sin\,\omega t = A(\omega)\sin(\omega \mathrm{t} + \varphi(\omega)).$$

Напротив, нелинейное средство измерений искажает синусоидальный сигнал, поданный на его вход, выходной сигнал синусоидальным не будет.

В соответствии с ГОСТ 8.009 [3] полные динамические характеристики могут быть представлены и нормированы в виде таблицы, графика или функции. Наиболее удобным и естественным функциональным представлением КЧХ, удобным для анализа устойчивости и быстродействия средств измерений, является комплексно-значная дробь:

$$K(j\omega) = \frac{a_m (j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \ldots + a_1 j\omega + 1}{b_n (j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \ldots + b_1 j\omega + 1}.$$

Эта форма аналогична форме представления *передаточной функции* аналоговых линейных средств измерений:

$$K(p) = \frac{a_m (p)^m + a_{m-1}(p)^{m-1} + \ldots + a_1 p + 1}{b_n (p)^n + b_{n-1}(p)^{n-1} + \ldots + b_1 p + 1},$$

которая есть преобразование Лапласа импульсной переходной характеристики $k(t)$ и также является полной динамической характеристикой линейных средств измерений.

У физически реализуемых КЧХ и передаточных функций степень числителя не превышает степени знаменателя, то есть $m \le n$. Кроме того мнимые части корней знаменателя КЧХ должны быть положительными.

Из теории автоматического управления известно, что все физически реализуемые аналоговые измерительные преобразователи являются минимальнофазовыми динамическими преобразователями. Признак минимальнофазовости: мнимые части корней числителя КЧХ не должны быть отрицательными. Переходные характеристики неминимальнофазовых устройств в момент подачи на их вход ступенчатого сигнала изменяются в сторону, противоположную устойчивому положению. Примером неминимальнофазового устройства является автомобиль при движении задним ходом, поскольку он не может отойти задним ходом от стены, расположенной вплотную к нему. Такими же примерами могут быть летательные или мореходные аппараты, рули которых находятся позади центра их симметрии или центра тяжести.

ФЧХ и АЧХ минимальнофазовых преобразователей взаимнооднозначно связаны преобразованием Гильберта. Поэтому на практике вместо нормирования КЧХ в целом часто прибегают к нормированию только АЧХ.

Физический смысл импульсной переходной характеристики — это выходной сигнал линейного аналогового преобразователя, возникающий, как реакция преобразователя на входной сигнал в виде δ -функции, то есть очень короткого импульса, мощность которого достаточна для получения заметного сигнала на выходе. Такая физическая трактовка импульсной переходной характеристики может быть подтверждена экспериментом очень приблизительно потому, что математическое определение δ-функции имеет вид

$$\delta(t)=\begin{cases}\infty, & t=0\\ 0, & t\neq 0\end{cases} \qquad \int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon}\delta(t)\,dt=1, \quad \varepsilon>0,$$

а такая функция физически нереализуема.

В общем случае импульсная переходная характеристика есть линейная комбинация затухающих экспонент одного из видов: $Ce^{-\alpha t}$ или $Ce^{-\alpha t}\cos(\beta t+\delta)$.

Переходная характеристика — это выходной сигнал линейного аналогового преобразователя, возникающий, как реакция преобразователя на входной сигнал в виде единичного скачка.

Амплитудно-частотная характеристика — это зависящее от частоты отношение амплитуды синусоидального выходного сигнала к амплитуде вызвавшего его синусоидального входного сигнала (то есть коэффициент усиления амплитуды).

Фазо-частотная характеристика — это зависящий от частоты сдвиг фазы $\varphi(\omega)$ выходного синусоидального сигнала по отношению к фазе вызвавшего его синусоидального входного сигнала.

$$A(\omega)=\left|K(j\omega)\right|, \quad K(j\omega)=A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

На рис. 3.1 в качестве примеров представлены графики некоторых из перечисленных характеристик первого и второго порядка, чему соответствуют индексы у обозначений этих характеристик. Переходная характеристика и импульсная переходная характеристики второго порядка имеют колебательный характер, АЧХ на резонансной частоте может иметь максимум, а ее ФЧХ с увеличением частоты стремится к (- π). ФЧХ всех физически реализуемых динамических звеньев отрицательны. Это говорит о том, что преобразование изменяющихся во времени величин сопровождается запаздыванием, различным на различных частотах.

В ряде случаев достаточными для применения оказываются менее подробные *частные динамические характеристики*, такие как *время реакции* t_r или нижняя $\omega_н$ и верхняя $\omega_в$ частоты, между которыми амплитудно-частотная характеристика отклоняется от своего номинального значения не более, чем на заданную величину. На рис. 3.1 показана лишь верхняя частота $\omega_В$ частотной полосы. *Время* *реакции средства измерений* (*response time*) — интервал времени между моментом скачкообразного изменения сигнала на входе средства измерений и моментом, начиная с которого выходной сигнал отличается от своего установившегося значения не более, чем на заданную величину (например, не более, чем на предел допускаемой основной погрешности).

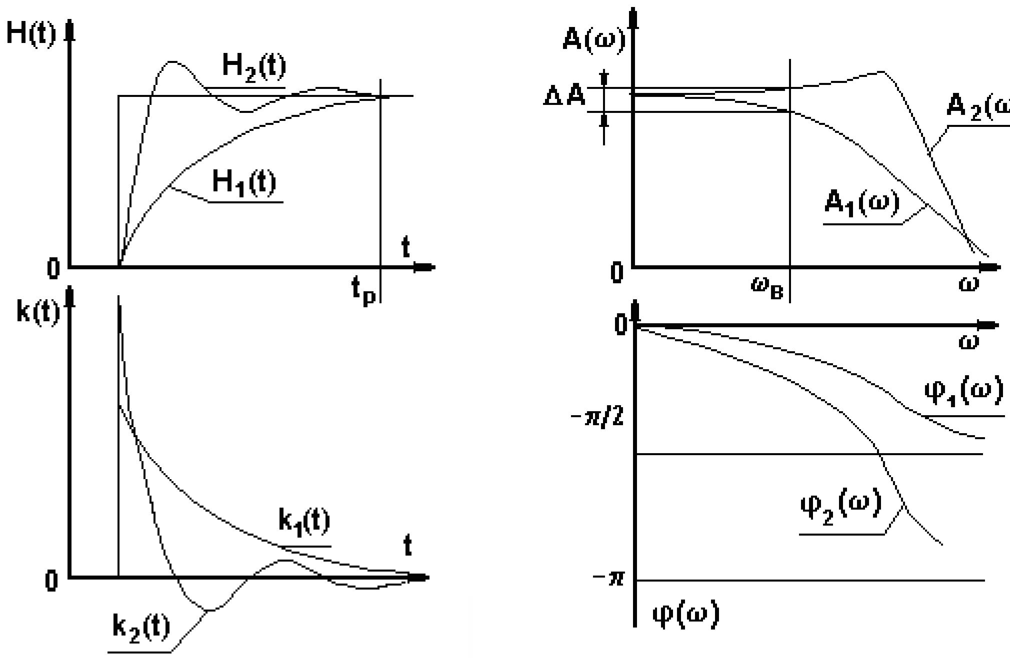

Рис. 3.1. Полные и частные динамические характеристики

Цифровые средства измерений, работающие дискретно, строго говоря, линейными не являются, поскольку их реакция на входной синусоидальный сигнал есть набор дискретных значений или ступенчатый сигнал. Поэтому полные динамические характеристики для них не нормируются.

Динамическими характеристиками цифровых средств измерений являются:

- *максимальная частота измерений* (число измерений в единицу времени),

- *длительность цикла одного преобразования*.

- *погрешность датирования отсчетов*, в качестве которой в большинстве случаев используется длительность цикла преобразования.

В практике представления динамических характеристик некоторых АЦП иногда указывается АЧХ, несмотря на их нелинейность, вызванную дискретностью. Это может быть целесообразно в тех случаях, когда длительность цикла преобразования в сотни и тысячи раз меньше, чем период наивысшей частоты, до которой нормируется АЧХ. В этих случаях в качестве АЧХ принимается отношение амплитуды синусоиды, огибающей дискретные значения выходного сигнала, к амплитуде синусоидального сигнала, действующего на входе. Такой подход применяется, например, к ΣΔ - АЦП.

Динамические характеристики цифроаналоговых преобразователей и программно управляемых калибраторов:

- *максимальный темп смены входного кода* при условии обеспечения установления значения выходной величины с нормированной точностью,
- *время реакции на смену входного кода*.

При управлении цифровым измерительным прибором, аналого-цифровым преобразователем, ЦАП или калибратором от компьютера значения перечисленных характеристик должны указываться с учетом быстродействия элементов используемого интерфейса, управляющих программ и компьютера.

3.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОБЪЕКТОМ И ВНЕШНИМИ СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Характеристиками свойств средства измерений, отражающими их способность к взаимодействию с внешними объектами или устройствами, являются:

- *диапазон изменения измеряемой величины* на входе средства измерений (*диапазон измерения*),

- *входное сопротивление* (или входной импеданс, или сила потребляемого от объекта тока) для средств измерений силы тока, напряжения, мощности, электрической энергии, измерительных преобразователей с электрическим входным сигналом),

- *выходное сопротивление* (или выходной импеданс) — для аналоговых измерительных преобразователей с электрическим выходным сигналом,

- вид выходного кода, количество разрядов выходного кода аналого-цифровых преобразователей и цифровых приборов, снабженных устройствами связи с компьютером (процессором),

- вид входного кода, количество разрядов входного кода, цена единицы младшего разряда входного кода ЦАП и кодоуправляемых калибраторов,

- другие характеристики средств измерений, отражающие их способность влиять на объект измерения, на информативные параметры сигнала измеряемой величины.

3.5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Метрологические характеристики, нормируемые для аналоговых измерительных приборов:

- диапазон изменения измеряемой величины,

- предел допускаемой основной приведенной погрешности, выражается в %%,

- собственное сопротивление или импеданс (нормируется только для электроизмерительных приборов),

- предел допускаемой дополнительной погрешности, выражается в долях (обычно 0.5 или 1.0) от предела допускаемой основной приведенной погрешности и нормируется для каждой влияющей величины раздельно.

Основная погрешность аналоговых измерительных приборов нормируется без разделения на мультипликативную и аддитивную составляющие. Случайная составляющая погрешности подобных приборов практически отсутствует, если не считать возможного случайного характера погрешности от трения подвижных частей.

Приведенная погрешность нормируется с целью избавиться от размера измеряемой величины. Для этого абсолютная погрешность Δ приводится к некоторому условному нормирующему значению измеряемой величины $x_{\text{норм}}$, и для нее во всем диапазоне изменения измеряемой величины устанавливается предел допускаемых значений

$$\left|\frac{\Delta}{x_{\text{норм}}}\right| 100\% \le \gamma_{\text{прив}},$$

откуда следует, что основная абсолютная погрешность средства измерений, пригодного к применению, в любой точке диапазона измерений должна удовлетворять неравенству

$$|\Delta| \le \frac{\gamma_{\text{прив}}}{100} |x_{\text{норм}}|$$

Аналоговым измерительным приборам с непосредственным отсчетом присваивается *класс точности* (*class index*), который обозначается числом, равным пределу допускаемой основной приведенной погрешности $\gamma_{\text{прив}}$. Стандартом ГОСТ 8.401 [21] предписывается выбирать значение $\gamma_{\text{прив}}$ из следующего ряда чисел:

$$1 \cdot 10^n; 1{,}5 \cdot 10^n; (1{,}6 \cdot 10^n); 2 \cdot 10^n; 2{,}5 \cdot 10^n; (3 \cdot 10^n); 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n,$$

где n = 1, 0, -1, -2, ... Значения, указанные в скобках, не рекомендованы и используются в порядке исключения. Обозначение класса точности прибора обычно изображается на шкале или лицевой панели прибора

Единственная динамическая характеристика, которую имеет смысл нормировать для аналоговых приборов, это время установления показаний, то есть время реакции, которое для всех подобных приборов равно, по умолчанию, примерно 1 с и специально не указывается.

3.6. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цифровые измерительные приборы, как правило, электронные, выполняют измерения в дискретные моменты времени по сигналу запуска, который может периодически вырабатываться в самом приборе, подаваться тем или иным способом вручную или от внешних устройств, например, от компьютера. В большинстве случаев при нормировании характеристик погрешности цифровых приборов учитываются мультипликативная и аддитивная составляющие погрешности. Поэтому для линейных цифровых приборов основная *относительная* погрешность нормируется линейной функцией от измеряемой величины. Поскольку нормирующая функция линейна, для ее представления достаточно двух чисел, которые являются коэффициентами нормирующей *двучленной формулы*. Эта формула выводится из общего выражения для абсолютной инструментальной погрешности (2.9), (2.10). Коэффициенты c и d двучленной формулы в соответствии с ГОСТ 8.401 [21] выбираются из ряда чисел, приведенного в предыдущем разд. 3.5, и выражаются в процентах:

$$\left|\gamma_{\text{инст}}\right| \le \left[c + d\left(\left|\frac{x_{\max}}{x}\right| - 1\right)\right]\%, \tag{3.1}$$

Обратимся снова к абсолютной инструментальной погрешности:

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\gamma_{\text{инст}} x}{100} = \frac{\Delta K}{K} x + \varepsilon .$$

Из последних двух выражений следует, что допускаемые значения абсолютной инструментальной погрешности цифрового прибора, как и предельные значения погрешностей результатов измерений, могут быть ограничены двумя прямыми линиями, показанными на рис. 2.5 и 3.2. В начале диапазона измерения при $x = 0$ погрешность определяется только аддитивной составляющей ε, а d есть не что иное, как предел допускаемой приведенной аддитивной погрешности. В конце диапазона при $x = x_{\max}$, как это следует из двучленной формулы, пределом допускаемой приведенной погрешности является коэффициент c.

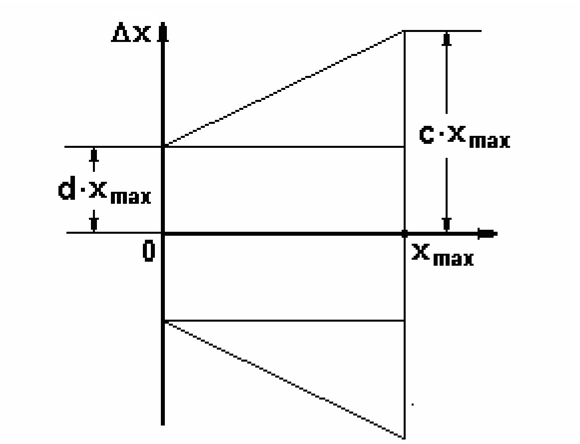

Рис. 3.2. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности линейных средств измерений

Метрологические характеристики, нормируемые для цифровых приборов:

- диапазон измерения,

- пределы допускаемой основной *относительной* погрешности, нормируются двучленной формулой (2.16) путем задания коэффициентов c и d,

- входное сопротивление (импеданс), нормируется только для электроизмерительных приборов,

- количество разрядов, представляемых на индикацию,

- цена единицы младшего разряда индикации результатов измерений,

- вид, число разрядов и цена единицы младшего разряда выходного кода, нормируется в случаях наличия связи с компьютером или печатающим устройством,

- пределы допускаемой дополнительной погрешности,

- максимальная частота измерений (представляется в *1/с*) или длительность цикла одного преобразования (представляется в *с*),

- погрешность датирования отсчетов,

- максимальная скорость обмена информацией с внешними устройствами, нормируется в случаях, когда такая связь предусмотрена.

Класс точности цифровых приборов в соответствии с ГОСТ 8.401 [21] обозначается двумя цифрами, равными коэффициентам двучленной формулы, разделенными косой чертой: c/d.

Если цифровой прибор предназначен для выполнения измерений в динамическом режиме с записью результатов в устройство памяти или компьютер, а на его входе включен аналоговый инерционный преобразователь (например, фильтр), то нормируются динамические характеристики этого предыдущего аналогового преобразователя.

Точно так же нормируются метрологические характеристики измерительных каналов ИИС, которые содержат аналоговые инерционные преобразователи и заканчиваются аналого-цифровым преобразованием. Для них нормирование динамических характеристик аналоговой части является обязательным. Для цифровых приборов и измерительных каналов ИИС обычно достаточно нормировать частные динамические характеристики, такие, как время реакции или границы частотной полосы.

Нормы на максимальную частоту измерений, длительность цикла преобразования и на погрешность датирования отсчетов в измерительном канале ИИС должны устанавливаться с учетом быстродействия системы обмена информации в ИИС и дисциплины этого обмена.

Производитель цифровых приборов и ИИС вправе нормировать погрешности выпускаемых средств измерений не двучленной формулой, а пределом допускаемой основной приведенной погрешности.

3.7. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1*. Для линейных аналоговых измерительных преобразователей нормируются следующие метрологические характеристики (см. также разд. 2.2 и метрологическую структурную схему рис. 2.1):

- диапазон изменения входного сигнала измерительной информации,
- коэффициент преобразования, представляется своим номинальным значением,
- входное сопротивление или импеданс с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него,
- выходное сопротивление или импеданс с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него,
- для нелинейных датчиков нормируется предел допускаемой приведенной погрешности,
- если датчики линейны, нормируются пределы основной *относительной* погрешности в виде двучленной формулы (формулы (2.16), (2.17) и (3.1)) посредством указания значений коэффициентов c и d; при наличии существенной случайной составляющей погрешности

выполняется раздельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих,

- пределы допускаемой дополнительной погрешности (по каждой из влияющих величин раздельно),

- одна из полных динамических характеристик, перечисленных в разд. 3.3 и соответствующих назначению преобразователя; в обоснованных случаях допускается нормировать частные динамические характеристики с указанием номинальных значений и пределов допускаемых отклонений от них.

В соответствии с ГОСТ 8.009 [3] случайная составляющая считается существенной, если ее среднеквадратическое значение составляет не менее 10 % от общей погрешности.

2*. Для преобразователей с незначительной нелинейностью, которая рассматривается, как причина *погрешности от нелинейности,* в соответствии с материалами, приведенными выше, мультипликативная погрешность выделена быть не может. Поэтому для таких преобразователей основная погрешность нормируется пределом допускаемой основной приведенной погрешности, как для аналоговых приборов. Все остальные метрологические характеристики те же, что и у линейных аналоговых преобразователей. Заметим только, что в этом случае из-за нелинейности преобразователей нормируются частные динамические характеристики, чаще всего время реакции.

3*. Для преобразователей с существенной нелинейностью нормируются те же характеристики, что и в предыдущем случае, за исключением коэффициента преобразования и полных динамических характеристик, которые не применимы к нелинейным преобразователям.

Вместо коэффициента преобразования указывается номинальная функция преобразования в виде функциональной зависимости, графика или таблицы. Отклонения реальных функций преобразования от номинальной учитываются в составе основной погрешности, нормируемой, как в предыдущем случае, в форме приведенной погрешности.

В качестве динамической характеристики нормируется, как правило, частная динамическая характеристика — время реакции, возможно, при скачках входного сигнала различной величины.

4*. Для всех преобразователей, выходной сигнал которых содержит пульсации, погрешность, вызванная этими пульсациями должна входить в состав и учитываться, как составная часть основной погрешности.

3.8. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ И ЦИФРОАНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1*. Для аналого-цифровых преобразователей (АЦП) нормируются следующие метрологические характеристики:

- диапазон изменения входного сигнала измерительной информации,
- для линейных АЦП — пределы допускаемой основной *относительной* погрешности, нормируются двучленной формулой (формулы (2.16) и (3.1)) путем задания коэффициентов c и d; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется раздельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих,
- для АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного сигнала (см. также разд. 2.5) — предел допускаемой основной *приведенной* погрешности,
- входное сопротивление (импеданс),
- вид выходного кода и количество разрядов,

- цена единицы младшего разряда выходного кода (см. разд. 2.5, рис. 2.10),

- пределы допускаемой дополнительной погрешности,

- максимальная частота измерений (представляется в *1/с*) или длительность цикла одного преобразования (представляется в *с*), указываются с учетом быстродействия устройств связи с компьютером и дисциплины организации этой связи,

- погрешность датирования отсчетов, указывается с учетом быстродействия устройств связи с компьютером и дисциплины организации этой связи,

Для АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного сигнала (см. разд. 2.5, формулы 2.23), указывается номинальная функция преобразования $f(x)$.

В соответствии с ГОСТ 8.401 [21] класс точности линейного АЦП обозначается двумя цифрами, равными коэффициентам двучленной формулы (2.16), разделенными косой чертой: c/d. Класс точности АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного напряжения (тока) обозначается одной цифрой, равной пределу допускаемой приведенной погрешности.

Производитель АЦП вправе нормировать основную приведенную погрешность одним числом.

Если на входе АЦП включен аналоговый инерционный преобразователь (например, фильтр), то нормируются динамические характеристики этого преобразователя, чаще всего, время реакции.

2*. Для цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) нормируются следующие метрологические характеристики:

- вид входного кода, диапазон его возможных значений, номинальная цена единицы младшего разряда входного кода (см. разд. 2.5, рис. 2.11),

- диапазон изменения величины на выходе ЦАП, соответствующий диапазону значений входного кода,

- пределы допускаемой основной относительной погрешности, нормируются двучленной формулой (формулы (2.16), (3.1)) путем задания коэффициентов c и d; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется раздельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих,

- пределы допускаемых изменений нагрузки, в которых гарантируется нормированное значение основной погрешности ЦАП,

- пределы допускаемых дополнительных погрешностей — для каждой влияющей величины нормируются раздельно,

- время реакции выходного сигнала на изменение входного кода на величину, равную 80 % от диапазона значений этого кода.

В случаях, когда ЦАП проектируется, как нелинейный, указывается номинальная функция преобразования $f(x)$.

Основная погрешность в этом случае нормируется пределом допускаемой приведенной погрешности. Она включает в себя возможные отклонения реальных функций преобразования конкретных экземпляров ЦАП.

3.9. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОЗНАЧНЫХ И МНОГОЗНАЧНЫХ МЕР

1*. Для однозначных мер нормируются следующие метрологические характеристики:

- номинальное значение величины, воспроизводимое мерой,

- предел допускаемой основной относительной погрешности воспроизведения значения величины,

- действие влияющих величин на значения воспроизводимой величины нормируется одним из способов:

пределами допускаемых дополнительных погрешностей — по каждой влияющей величине раздельно,

функциональной зависимостью значения воспроизводимой величины от влияющих величин — для введения поправок.

2*. Для многозначных мер нормируются следующие метрологические характеристики:

- диапазон значений величины, воспроизводимых мерой,
- значение наименьшей ступени величины, воспроизводимой мерой,
- выходное сопротивление или импеданс — для мер, воспроизводящих электрические величины, или характеристика взаимодействия меры с устройством, для которого воспроизводится величина,
- пределы допускаемой основной относительной погрешности воспроизведения значений величины, нормируются двучленной формулой (формулы (2.16), (3.1)) путем задания коэффициентов c и d, при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется раздельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих,
- пределы допускаемой дополнительной погрешности, нормируются по каждой величине раздельно,
- для мер, управляемых дистанционно (например, от компьютера) указывается вид входного кода, диапазон его возможных значений, номинальная цена единицы младшего разряда входного кода, время реакции выходного сигнала на изменение входного кода на величину, равную 80 % от диапазона значений этого кода.

3.10. ПОГРЕШНОСТИ, ВНОСИМЫЕ ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Важнейшим компонентом современных измерительных информационных систем является их программное обеспечение, предназначенное, в частности, для обработки результатов прямых измерений с целью получения результатов прямых (отфильтрованных и линеаризованных) измерений, а также косвенных, совместных и совокупных измерений. Эти функции выполняются *метрологически значимыми* частями ПО и подлежат метрологическому анализу. Понятно, что не может быть и речи о нормировании метрологических характеристик таких программ. Можно лишь оценивать характеристики порождаемых ими погрешностей. Общие рекомендации по метрологической аттестации программного обеспечения средств измерений, в том числе, алгоритмов и программ вычислений регламентируются нормативными документами МИ 2955 [13] и МИ 2174 [14].

При современном уровне развития средств вычислительной техники можно говорить о том, что, по-видимому, по сравнению с такими погрешностями, как погрешность от округления, погрешность от преждевременной остановки итерационных процессов самый значительный вклад в погрешность окончательного результата при корректном программировании вносит *наследственная* или *трансформированная погрешность*, возникающая как результат преобразований погрешностей прямых измерений в ходе штатной математической обработки.

Конечно, в соответствии с канонами метрологии эти метрологически значимые части должны претерпевать метрологическую аттестацию. Это можно делать путем математического моделирования в условиях и при значениях измеряемых параметров, близких к условиям и параметрам штатно функционирующего объекта. Может быть применена менее трудоемкая процедура, которая позволяет достичь требуемой достоверности результата. Эта процедура установлена ГОСТ 26.203 [22] и заключается в том, что каждая программа обработки результатов прямых измерений содержит внутри себя подпрограмму вычисления характеристики трансформированной погрешности в виде *интервала неопределенности* и на выходе выдает результат в виде двух границ интервала неопределенности значения измеряемой величины, оставшегося после измерения. Именно при такой организации программ вычислений возможна их метрологическая аттестация, которая в этой ситуации естественным образом должна выполняться путем сопоставления реальной погрешности с тем интервалом неопределенности результата, который определяется собственной подпрограммой. В настоящее время работы в этом направлении успешно развиваются.

На точность реализации программного обеспечения средств измерений существенное влияние могут оказывать преднамеренные и непреднамеренные искажения, которые могут вноситься в программы вычислений преднамеренно (с внешней стороны – вирусами или преднамеренными диверсионными действиями) или непреднамеренно (ошибочными действиями оператора или сбоями вычислительных средств). Поэтому к программному обеспечению средств измерений, равно как и к программам, фиксирующим катастрофические ситуации, в последнее время стали предъявляться требования по их защите от таких искажений. Понятно, что требования по такой защите не могут быть выражены в метрологических терминах, но тем не менее эти требования должны выполняться и их исполнение должно контролироваться при всех видах метрологических испытаний средств измерений в соответствии с нормативными документами ГОСТ Р 8.654 [10], Р 50.2.077 [11] и МИ 3286 [12], как это описано в разд. 1.5. Возможность такого контроля должна быть обеспечена при создании программного обеспечения средств измерений.

3.11. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В соответствии с определениями и видами погрешностей средств измерений и результатов измерений эти погрешности классифицируются по следующим признакам.

Признак — **происхождение**:

- инструментальные,

- *методические погрешности*, то есть погрешности, вызванные несовершенством используемого метода измерений,

- погрешности применения.

Признак — **условия эксплуатации**:

- *основная погрешность* (*intrinsic error*) — погрешность средства измерений, то есть инструментальная погрешность в *нормальных условиях эксплуатации* (*in reference conditions*),

- погрешность в *рабочих условиях эксплуатации* (*in normal conditions*) — состоит из двух составляющих: основной погрешности и *дополнительной погрешности*.

Такое разделение погрешностей необходимо для того, чтобы обеспечить арбитражные испытания средств измерений в одних и тех же условиях. Это обстоятельство подчеркнуто в английском наименовании нормальных условий: «*reference conditions*».

Нормальные условия эксплуатации устанавливаются в соответствии с ГОСТ 8.395 [9]. Нормальные условия — это довольно жесткие ограничения на пределы допускаемых изменений значений влияющих величин (например, температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления, параметров внешних электрических и магнитных полей, напряжения питания, солнечной радиации, амплитуды вибраций, интенсивности солнечной радиации и других), при которых определяется и контролируется основная погрешность средств измерений во время их метрологических испытаний. Такие ограничения необходимы для обеспечения взаимного доверия к результатам контроля метрологических характеристик, проводимого в стандартизованных условиях. Рекламации, вызванные превышением основной погрешностью установленной для нее нормы, принимаются только в том случае, когда это превышение установлено в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность (*complementary error*) — составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или ее выхода за пределы нормальной области значений.

Признак — **характер зависимости от измеряемой величины**:

- мультипликативная, пропорциональная значению измеряемой величины,

- аддитивная — не зависит от измеряемой величины.

Признак — **характер проявления**:

- систематическая,

- случайная.

Признак — **режим измерения**:

- погрешность измерений в статическом режиме,

- погрешность измерений в динамическом режиме.

Признак — **способ представления**:

- абсолютные,

- относительные,

- приведенные (*fiducial errors*).

Приведенные погрешности вычисляются, как отношение абсолютной инструментальной погрешности средства измерений, определяемой формулами (2.4), (2.10), к нормирующему значению измеряемой величины (*fiducial value of a measurand*) и выражаются, как правило, в процентах:

$$\gamma_{\text{прив}} = \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x_{\text{норм}}} 100\% .$$

Установленный и проконтролированный предел допускаемой основной приведенной погрешности, выраженный в процентах от нормирующего значения измеряемой величины, используется в качестве условного обозначения *класса точности* (*class index, acuracy class*) измерительных приборов и преобразователей.

В тех случаях, когда для средств измерений нормируется предел допускаемой *относительной* погрешности и для них указывается класс точности, то для обозначения класса точности используется число равное нормированному пределу относительной погрешности и выраженное в %%. Если этот предел представлен двучленной формулой с коэффициентами c и d, то для обозначения класса точности используется дробь c/d (см. также разд. 2.3).

4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ

Настоящий раздел в равной степени относится как к теоретической, так и к прикладной области метрологии.

С теоретической областью метрологии его сближает применение в нем математических методов корректной обработки данных с целью принятия на основе этих методов правомерных решений о реальных метрологических характеристиках (при калибровке) или о пригодности или непригодности применения испытуемых средств измерений (при поверке).

Прикладная сторона данного раздела заключается в том, что его материалы являются руководством к практическому выполнению требуемой математической обработки результатов измерений, выполняемых при метрологических испытаниях средств измерений, то есть при калибровке или поверке. Процедура фактического выполнения экспериментов и получения выборочных значений погрешности при поверке или калибровки методами «по мере» или «по образцовому прибору», описана в разделе 1.6.

Исходными данными в настоящем разделе являются результаты измерений $x_1, x_2, ..., x_n$ или выборочные значения погрешностей $\Delta_1, \Delta_2, ..., \Delta_n$, полученные при метрологических испытаниях средств измерений. Принято, что в общем случае инструментальные погрешности средств измерений содержат случайную составляющую, и поэтому для их обработки применяются статистические методы. Для того, чтобы освободиться от мало обоснованных и трудно проверяемых априорных предположений о виде закона распределения погрешностей или о наличии грубых промахов, там, где это возможно, излагаются свободные от распределения (*distribution-free*) методы обработки. Кроме того на основе использования фидуциальных вероятностей излагаются статистические методы проверки сложных гипотез с контролем вероятностей ошибок первого и второго рода, иными словами, с контролем рисков производителя и потребителя.

Естественно, что при пренебрежимо малом содержании случайной составляющей погрешности методы обработки становятся тривиальными и являются частными случаями общих статистических методов, изложенных в разделе.

В отечественных и в международных метрологических нормативных документах для нормирования инструментальных погрешностей средств измерений предусмотрены следующие характеристики, перечисленные в разд. 3.5:

- пределы допускаемой абсолютной погрешности $\left(-\Delta_{\text{доп}}, +\Delta_{\text{доп}}\right)$,
- пределы допускаемой относительной погрешности $\left(-\gamma_{\text{отн}}, +\gamma_{\text{отн}}\right)$,
- пределы допускаемой приведенной погрешности $\left(-\gamma_{\text{прив}}, +\gamma_{\text{прив}}\right)$.

При реальных измерениях границы интервалов остаточной неопределенности (погрешности) значения измеряемой величины устанавливаются относительно полученного результата $\tilde{x}$ либо в единицах измеряемой величины, либо в относительных единицах. И в том и в другом случае при наличии случайных погрешностей или случайного разброса показаний этим интервалам приписывается близкая к единице вероятность из промежутка (0,8 ÷ 0,95) вне зависимости от формы выражения случайных погрешностей: абсолютной, относительной или приведенной. Поэтому, чтобы не перегружать настоящий раздел излишними обозначениями, будем применять для обозначения всех случайных погрешностей, как случайных величин, одну из греческих букв ξ или η, а для обозначения тех конкретных значений, которые принимают случайные погрешности — соответствующие им латинские буквы x и y.

Теоретическими основами статистических методов обработки данных являются положения теории вероятностей, с которых будет начинаться настоящий раздел.

4.2. ОПИСАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

4.2.1. Вероятность, функция распределения и плотность распределения случайной величины (случайной погрешности)

Вероятность $P(A)$ случайного события A *есть мера возможности его осуществления*. Если A — невозможное событие, то $P(A) = 0$, и напротив, если A — достоверное событие, то $P(A) = 1$. Для всех промежуточных видов случайных событий $0 \le P(A) \le 1$.

Пусть A и B — случайные события. Случайное событие $A \cup B$ есть *объединение событий* A и B. Это значит, что случайное событие $C = A \cup B$ происходит тогда, когда происходит либо событие A или событие B. Случайное событие $D = A \cap B$ есть *пересечение событий* A и B. Это означает, что событие D происходит тогда, когда одновременно происходят события A и B.

Если события A и B происходят независимо друг от друга, то вероятность их пересечения равна произведению $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$. Вероятность объединения событий равна $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$.

Если события *несовместны*, то есть если появление одного из них исключает появление второго, то $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$.

Если события $A_1, A_2, \ldots, A_n$ — попарно несовместны, то $P(A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \ldots + P(A_n)$. Это свойство называется *аддитивностью вероятностной меры*.

Точно так же, если события $A_1, A_2, ..., A_n$ — попарно *независимы,* то есть происходят независимо друг от друга, то $P(A_1 \cap A_2 \cap ... \cap A_n) = P(A_1)P(A_2)...P(A_n)$.

Пусть ξ — общее обозначение *случайной величины* (случайной погрешности). Наиболее полной ее характеристикой является представленная на рис. 4.1, *а интегральная функция распределения* $F(x) = P(\xi \leq x)$, где x — значение, которое может принять случайная величина в результате какого-либо испытания. Понятно, что функция $F(x)$ монотонно возрастает от 0 до 1, ибо при $x = -\infty$ мера возможности принять случайной величине хотя бы какое-нибудь значение равна нулю, ибо для этого ей не предоставлено место, то есть $F(-\infty) = 0$. С другой стороны, если $x = +\infty$, для значений случайной величины предоставлена вся ось, потому в любом случае она примет, хотя бы какое-нибудь значение. $F(+\infty) = 1$. В промежутке между $-\infty$ и $+\infty$ интегральная функция распределения — неубывающая функция, ибо при расширении области возможных значений случайной величины вероятность попасть в эту область может разве лишь возрасти.

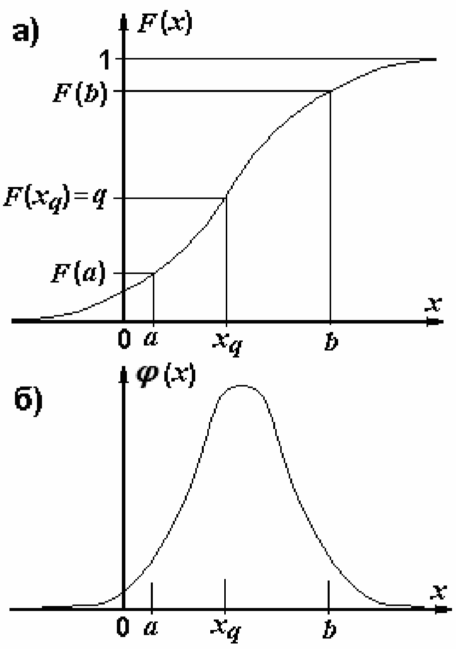

Рис. 4.1. Функция распределения и плотность распределения

Найдем вероятность того, что случайная величина (случайная погрешность) ξ примет значение в интервале $(a, b]$, то есть $P(a < \xi \leq b)$. Для этого разделим отрезок $(-\infty, b]$ на два непересекающихся отрезка $(-\infty, a]$ и $(a, b]$. Два события: «случайная величина ξ принимает значение из отрезка $(-\infty, a]$» и «случайная величина ξ принимает значение из отрезка $(a, b]$» не могут произойти одновременно, значит, они не пересекаются или несовместны.

Поэтому $P(-\infty < \xi \leq b) = P(-\infty < \xi \leq a) + P(a < \xi \leq b)$. Но, по определению, $P(-\infty < \xi \leq b) = F(b)$ и $P(-\infty < \xi \leq a) = F(a)$. А это значит, что

$$P(a < \xi \leq b) = F(b) - F(a).$$

Теперь представим себе, что ось 0X — есть материальный стержень, вес которого по его длине описывается функцией $F(x)$. Понятно, что ее удельный вес, то есть плотность не одинакова по длине. Найдем распределение плотности этого стержня по его длине. Обозначим искомую плотность через $\varphi(x)$. Тогда:

$$\varphi(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx} = F'(x).$$

В связи с выполненными действиями функция $\varphi(x)$, представленная на рис. 4.1, *б*, называется *плотностью распределения вероятностей* случайной величины (случайной погрешности) ξ. Распространено и иное наименование этой функции, а именно, *закон распределения* случайной величины (случайной погрешности) ξ. Функция распределения $F(x)$ — неубывающая функция, поэтому плотность распределения $\varphi(x)$ неотрицательна: $\varphi(x) \geq 0$.

Пример графиков функции распределения и плотности распределения случайной величины приведены на рис. 4.1. Поскольку плотность $\varphi(x)$ — производная от функции распределения $F(x)$, то $F(x)$ — это интеграл от плотности, то есть $F(b)=\int\limits_{-\infty}^{b}\varphi(x)dx$. Всегда:

$$\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\varphi(x)dx = F(+\infty) = 1.$$

Вероятность того, что случайная величина (случайная погрешность) примет значение из интервала $(a, b]$, то есть вероятностная мера отрезка оси абсцисс между точками a и b, равна $P(a < \xi \le b) = F(b) - F(a) = \int\limits_{a}^{b}\varphi(x)dx$.

Поэтому вероятность того, что непрерывная случайная величина примет конкретное значение, например, a, равна нулю, ибо при $a = b$ последний интеграл равен нулю.

4.2.2. Числовые характеристики случайной величины (случайной погрешности)

Рассмотрим только те числовые характеристики случайной величины, которые применяются в метрологии, а также для анализа случайных погрешностей при измерениях.

Первой такой характеристикой является *математическое ожидание случайной величины*. Математическое ожидание называется также первым начальным моментом и обозначается двояко: $M[\xi]$ или $\mu_1[\xi]$ и выражается формулой:

$$M[\xi] = \mu_1[\xi] = \int\limits_{-\infty}^{\infty} x\,\varphi(x)dx. \tag{4.1}$$

Для выяснения смысла этой формулы снова перейдем к механической модели оси 0X. Снова представим эту ось в виде материального стержня, который может вращаться вокруг начала координат и удельный вес (плотность) которого описывается функцией $\varphi(x)$. Абсцисса центра тяжести $x_{\text{цт}}$ такого стержня определяется в механике из равенства моментов, как точка приложения равнодействующей силы, момент которой относительно оси вращения равен сумме вращающих моментов и противоположен им. Равнодействующая сила равна «весу» стержня, то есть интегралу $\int\limits_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)dx$, а сумма элементарных вращающих моментов равна $\int\limits_{-\infty}^{\infty} x\,\varphi(x)dx$. Поэтому $x_{\text{ЦТ}} \int\limits_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)dx = \int\limits_{-\infty}^{\infty} x\,\varphi(x)dx$. Но всегда $\int\limits_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)dx = 1$, значит, $x_{\text{ЦТ}} = \int\limits_{-\infty}^{\infty} x\,\varphi(x)dx$, что в точности совпадает с выражением для математического ожидания случайной величины ξ.

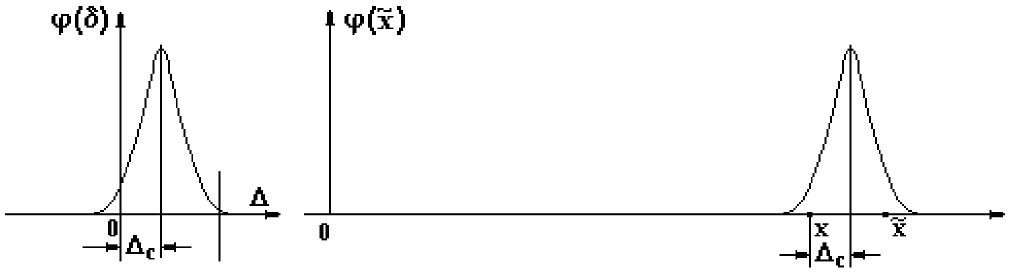

Рис. 4.2. Плотности распределения случайных погрешностей средства измерений (слева) и результатов многократных измерений (справа)

Применительно к случайной инструментальной погрешности $\gamma_{\text{инст}}$ средств измерений математическое ожидание $M[\gamma_{\text{инст}}]$ — это *систематическая погрешность* $\Delta_{\text{С}}$ средства измерений. При многократных измерениях таким средством неизменной величины x *математическое ожидание результатов измерений* $\tilde{x}$ — это сумма истинного значения измеряемой величины x и систематической погрешности средства измерений, то есть $M[\tilde{x}] = x + \Delta_{\text{С}}$. Приведенные соображения иллюстрируются рис. 4.2.

Мы видим, что математическое ожидание — это характеристика положения плотности распределения случайной величины на оси 0X.

Степень случайности погрешности или результатов измерений определяется шириной плотности распределения. Характеристикой степени случайности является *дисперсия* $D[\xi]$случайной величины ξ или *второй центральный момент* $\overset{0}{\mu}[\xi]$:

$$D[\xi]=\sigma^2[\xi]=\overset{0}{\mu}[\xi]=\int\limits_{-\infty}^{\infty}(x-M[\xi])^2\,\varphi(x)dx, \tag{4.2}$$

где $\sigma[\xi]$ — *среднеквадратическое значение* случайной величины ξ.

Применив механическую аналогию к этому выражению, увидим, что дисперсия случайной величины есть не что иное, как момент инерции фигуры, ограниченной плотностью распределения, относительно ее центра тяжести, то есть математического ожидания. Это следует из того, что момент инерции элементарной массы $\varphi(x)dx$ пропорционален квадрату ее расстояния от оси вращения, а интеграл справа — сумма моментов инерции элементарных масс. Понятно, что дисперсия не зависит от положения плотности распределения и характеризует лишь степень случайности: чем больше дисперсия, тем шире плотность распределения, тем больший разброс имеет случайная величина, в нашем случае — случайная погрешность средств измерений или результатов измерений.

Наиболее распространенной характеристикой погрешности является *интервал*, за пределы которого значения погрешности не выходят с некоторой вероятностью P = (0.9 ÷ 0.95). Для определения этого интервала необходимо ввести понятие *квантиль*.

Квантилью плотности распределения или случайной величины называется такое значение x_q, которое удовлетворяет уравнению $F(x_q)=q$ или эквивалентному уравнению $P(\xi\le x_q)=q$. Такая квантиль показана на рис. 4.1, *а* и называется $q{\cdot}100$ — процентной квантилью. В частности, 50-процентная квантиль, соответствующая $q = 0{,}5$, называется *медианой*. Если известны или заданы две квантили x_p и x_q, где $p > q$, то вероятность $P\left(x_q < \xi \le x_p\right) = p - q$. Таким образом, интервальной характеристикой случайной погрешности может служить интервал между двумя квантилями x_p и x_q при условии, что $P = (p - q)$. Поэтому этот интервал называется интерквантильным промежутком и обозначается J_P.

При фиксированной вероятности P такой интервал может быть задан бесконечным количеством способов. В дальнейшем в качестве интервальных характеристик случайных погрешностей мы будем рассматривать два вида однозначно определенных интерквантильных промежутков: промежуток $\overset{o}{J}_P$, симметричный относительно математического ожидания погрешности (см. рис. 4.3, *а*) и промежуток J_P, симметричный относительно начала координат (см. рис. 4.3, *б*). Второй из этих промежутков включает в себя систематическую и случайную погрешности, поэтому он шире промежутка $\overset{o}{J}_P$.

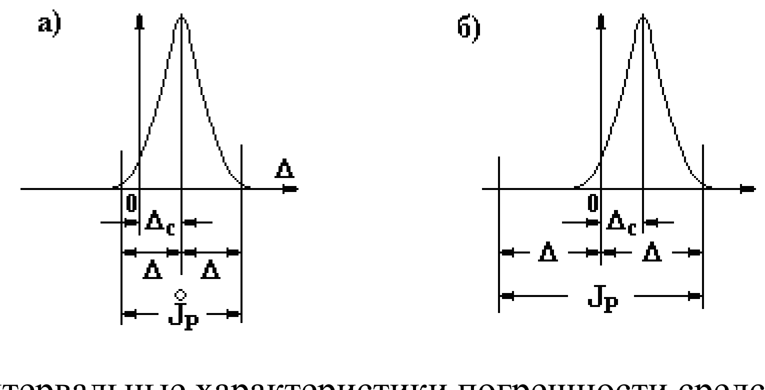

Рис. 4.3. Интервальные характеристики погрешности средств измерений:
а) симметричные относительно математического ожидания;
б) симметричные относительно начала координат

Итак, располагая массивом значений погрешности, полученных опытным путем, нам необходимо методами математической статистики определить три характеристики погрешности: математическое ожидание (систематическую погрешность или уточненное значение измеряемой величины), дисперсию или среднеквадратическое значение и интерквантильный промежуток.

Прежде, чем переходить к математической статистике, приведем некоторые примеры плотностей распределения случайных величин.

4.2.3. Примеры плотностей распределения случайных погрешностей

В примерах систематическая погрешность обозначена через c, то есть $c = \Delta_C$.

1*. *Плотность нормального распределения (нормальный закон)*

Плотностью нормального распределения описываются погрешности, вызванные тепловым шумом, а также совместным действием нескольких независимых примерно равнозначных случайных факторов.

График плотности распределения приведен на рис. 4.4. Плотность распределения случайной погрешности имеет вид:

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left\{-\frac{(\Delta - c)^2}{2\sigma^2}\right\}. \qquad (4.3)$$

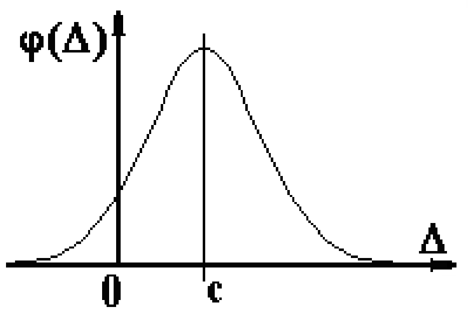

Рис. 4.4. Плотность нормального распределения

Математическое ожидание погрешности (систематическая составляющая) $M[\delta] = c$. Дисперсия случайной составляющей погрешности $D[\delta] = \sigma^2$. Среднеквадратическое значение случайной составляющей погрешности равно σ**.** Интервал J_P, содержащий P-ю долю значений случайной составляющей погрешности при $P_0 = 0.95$

$$J_{0.95} = [c - 1.96\,\sigma, c + 1.96\,\sigma].$$

2*. *Плотность равномерного распределения (равномерный закон)*

Плотностью равномерного распределения чаще всего описывают погрешность, вызванную округлением результатов измерений, которое неизбежно происходит при аналого-цифровом преобразовании из-за ограниченности количества разрядов аналого-цифрового преобразователя. Пример графика плотности равномерного распределения представлен на рис. 4.5. Параметрами этой плотности распределения являются: ширина $2h$ и математическое ожидание $\boldsymbol{c}$, то есть систематическая составляющая погрешности.

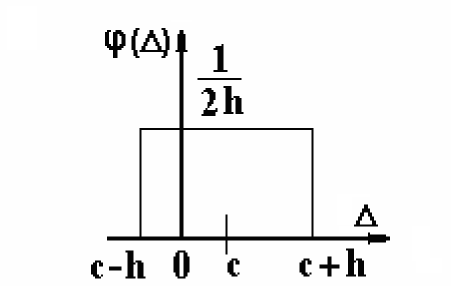

Рис. 4.5. Плотность равномерного распределения

Дисперсия случайной погрешности, которая распределена в соответствии с этой плотностью, равна $D[\delta] = h^2/3$, среднеквадратическое значение погрешности равно $h/\sqrt{3}$. Интервал J_P, содержащий P-ю долю значений случайной составляющей погрешности при $P = 0.95$:

$$J_{0.95} = [c - 0.95 \cdot h, c + 0.95 \cdot h] .$$

3*. *Плотность треугольного распределения (треугольный закон)*

Этой плотностью распределения описывается случайная погрешность, представляющая собой сумму двух независимых равномерно распределенных погрешностей. График плотности треугольного распределения представлен на рис. 4.6.

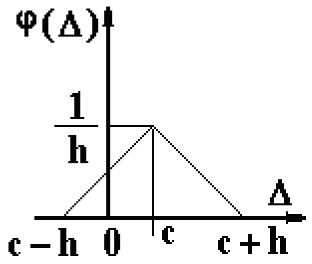

Рис. 4.6. Плотность треугольного распределения

Математическое ожидание (систематическая составляющая погрешности) $M[\delta] = c$, дисперсия погрешности $D[\delta] = h^2/6$, среднеквадратическое значение равно $h/\sqrt{6}$. Интервал J_P, содержащий P-ю долю значений случайной составляющей погрешности при $P = 0.95$:

$$J_{0.95} = [c - 0.975 \cdot h, c + 0.975 \cdot h].$$

4*. *Плотность распределения* ARCSIN

Этой плотностью распределения описываются случайные погрешности, вызванные синусоидальными помехами при измерениях, которые выполняются в случайные моменты времени, не синхронизированные с частотой сигнала помехи.

Плотность распределения ARCSIN имеет вид $\varphi(\Delta) = \dfrac{1}{\pi\sqrt{h^2 - (\Delta - c)^2}}$.

График плотности распределения представлен на рис. 4.7.

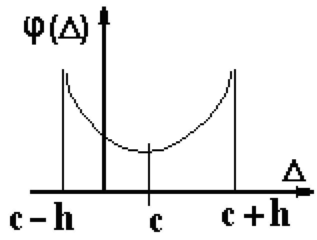

Рис. 4.7. Плотность распределения ARCSIN

Параметры плотности распределения: математическое ожидание (систематическая составляющая погрешности) $M[\delta]$ = c**,** дисперсия погрешности $D[\delta]=h^2/2$, среднеквадратическое значение равно $h/\sqrt{2}$. Интервал J_P, содержащий P-ю долю значений случайной составляющей погрешности при P = 0.95:

$$J_{0.95}=[c-0.997h, c+0.997h].$$

4.3. ПОДГОТОВКА МАССИВА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

4.3.1. Вариационный ряд

Пусть в результате n измерений получен массив выборочных значений погрешности или выборочных значений измеряемой величины $x_1, x_2,..., x_n$**,** который на языке математической статистики называется *выборкой*, элементы этого массива называются *выборочными значениями* измеряемой величины, а их количество — *объемом выборки*.

Вариационный ряд образуется путем перестановки исходного массива результатов многократных измерений в порядке их возрастания. Такая перестановка получается естественным путем при нанесении результатов на числовую ось. Элементы нового массива получают новые порядковые номера, и эти новые номера заключаются в круглые скобки:

$$x_{(1)}, x_{(2)}, \ldots, x_{(n)}. \tag{4.4}$$

При экспериментальном определении характеристик погрешности исходным массивом является массив выборочных значений погрешности $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_n$, из которых также составляется вариационный ряд

$$\Delta_{(1)}, \Delta_{(2)}, \ldots, \Delta_{(n)} . \tag{4.5}$$

Первый и последний члены вариационного ряда называются *крайними членами вариационного ряда*. Полусумма крайних членов вариационного ряда называется *срединой размаха выборки*:

$$x_{\text{ср}} = \left(x_{(1)} + x_{(n)}\right)/\,2, \text{ или } \quad \Delta_{\text{ср}} = \left(\Delta_{(1)} + \Delta_{(n)}\right)/\,2.$$

Средний по положению член вариационного ряда называется *выборочной медианой*. При нечетном n выборочной медианой для (4.4) и (4.5) является

$$\tilde{x}_{\text{med}} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \quad \text{или} \quad \Delta_{\text{med}} = \Delta_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \text{ соответственно.}$$

Вариационный ряд является основой для построения выборочной функции распределения.

4.3.2. Выборочная функция распределения

Выборочные функции распределения $\tilde{F}(x)$ и $\tilde{F}(\Delta)$являются оценками функций распределения результатов многократных измерений величины x, возмущенной случайными погрешностями, и погрешности средства измерений соответственно. Выборочные функции распределения строят с целью идентификации истинной функции распределения $F(x)$ или $F(\Delta)$**.** В дальнейшем, если иное не будет оговорено особо, мы будем пользоваться только одним обозначением аргумента функции распределения, поскольку все рассуждения и математические выкладки одинаковы для любых аргументов.

Математическое описание выборочной функции распределения соответствует описанию функции распределения:

$$\widetilde{F}(x) = n\left(x_{(i)} \le x\right) / n, \tag{4.6}$$

где $n(x_{(x)} \le x)$ — количество членов вариационного ряда, значение которых не превосходят *x***.**

Пример графика выборочной функции распределения приведен на рис. 4.8. Из этого графика видно, что выборочная функция распределения есть неубывающая ступенчатая функция с областью изменения [0,1]. Она возрастает скачком в каждой точке $x = x_{(i)}$**.** Размер каждого скачка равен 1/*n*, так что выборочная функция распределения на последнем значении вариационного ряда и далее становится и остается равной единице. На этом же графике показан интерквантильный промежуток $J_{0.7}$, соответствующий вероятности *P* = 0,7, которая определена по свойству интегральной функции распределения, установленному в разд. 4.2.1.

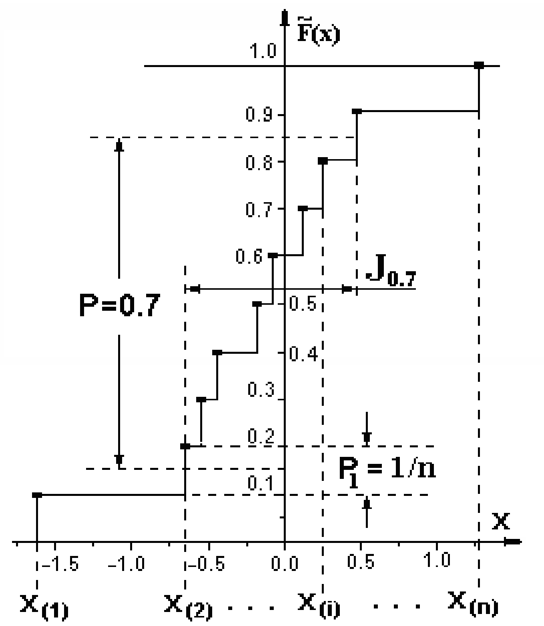

Рис. 4.8. Пример выборочной функции распределения

Кроме того на графике рис. 4.8 показано, что вероятностная мера промежутка между $x_{(1)}$ и $x_{(2)}$, то есть

$$P_1 = P\left(x_{(1)} < \xi \le x_{(2)}\right) = 1/n,$$

которая определена также в соответствии с разд. 4.2.1, будет в среднем одинаковой для всех промежутков между соседними выборочными членами (членами вариационного ряда):

$$P_i = P\left(x_{(i)} < \xi \le x_{(i+1)}\right) = 1/n \quad \forall i = 1, 2, ..., n-1. \tag{4.7}$$

4.3.3. Гистограмма

Статистической оценкой плотности распределения $\varphi(x)$ или $\varphi(\Delta)$ служит *гистограмма* $\tilde{\varphi}(x)$ или $\tilde{\varphi}(\Delta)$ соответственно, которая строится по выборочным данным в виде кусочно-постоянной функции. В дальнейшем, как и для выборочной функции распределения, мы будем использовать только одно обозначение аргумента, если иное не будет оговорено особо. Пример гистограммы приведен на рис. 4.9.

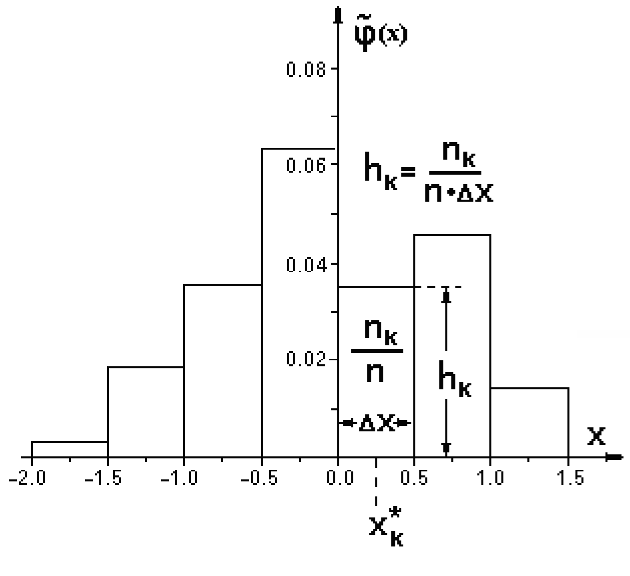

Рис. 4.9. Пример гистограммы

Гистограмма состоит из прямоугольников, построенных на полуоткрытых отрезках $\left(x_k, x_{k+1}\right]$ равной длины $\Delta x = x_{k+1} - x_k$, как на основаниях. Высота каждого k-го прямоугольника должна быть такой, чтобы его площадь была равна n_k / n, где n_k — количество выборочных значений, попавших в k-й отрезок $\left(x_k, x_{k+1}\right]$ оси 0X. Общее количество этих отрезков K. Для построения гистограммы необходимо разделить интервал между крайними членами вариационного ряда на отрезки равной длины таким образом, чтобы минимальное количество выборочных значений, находящихся внутри какого-либо из отрезков, было равно от 3 до 5. Если количество выборочных значений внутри k-го отрезка обозначить через n_k, то высота прямоугольника, который нужно построить на этом отрезке, как на основании, равна

$$h_k = \frac{n_k}{n\,\Delta x}.$$

В этом случае площадь фигуры, заключенной между гистограммой и осью абсцисс, будет равна 1.

4.4. ТОЧЕЧНОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

4.4.1. Оценки значений характеристик погрешности и результатов измерений измеряемой величины

Как следует из рис. 4.2 и 4.3, при наличии случайной составляющей погрешности измерений математическим ожиданием результатов измерений является сумма неизменной во времени измеряемой величины и систематической составляющей погрешности. Наиболее распространенной точечной оценкой математического ожидания является среднее арифметическое значение результатов многократных измерений, то есть выборочных данных:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \tilde{x} + \tilde{\Delta}_{\text{c}} x, \tag{4.8}$$

которая является несмещенной оценкой систематической погрешности средства измерений или значения измеряемой величины при любой плотности их распределения.

Если плотность распределения случайной погрешности симметрична относительно математического ожидания, то полезными оценками математического ожидания могут служить выборочная медиана $\tilde{x}_{\text{med}}$ или средина размаха выборки $x_{\text{ср}}$, которые также будут содержать в себе оценки значений измеряемой величины и систематической погрешности измерений.

Оценка математического ожидания может быть вычислена и по гистограмме:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{K} n_k x_k^* = \tilde{x} + \tilde{\Delta}_{\text{c}} x, \tag{4.9}$$

где x_k^* — середины интервалов, на которых построена гистограмма (см. рис. 4.9).

Эта оценка экономичнее в отношении трудоемкости вычислений, но качество ее хуже, ибо за счет группирования данных часть информации теряется.

При отсутствии систематической составляющей погрешности измерений среднее арифметическое значение есть несмещенная оценка значения измеряемой величины.

Если все повторные измерения выполняются независимо друг от друга, то несмещенная оценка s среднеквадратического значения σ случайной составляющей погрешности результата каждого одиночного измерения вычисляется по формуле

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}\ . \tag{4.10}$$

Эта оценка может быть вычислена и по гистограмме:

$$s=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{K}n_k\left(x_k^*-\bar{x}\right)^2+\frac{(\Delta x)^2}{12}}, \qquad (4.11)$$

где $\Delta x = x_{k+1} - x_k$ — ширина интервалов, на которых построена гистограмма (см. рис. 4.9).

Известно, что при усреднении n результатов измерений дисперсия результата уменьшается в n раз. Поэтому, если в качестве результата измерения величины x принять среднее арифметическое значение $\bar{x}$, то оценкой среднеквадратического значения случайной погрешности этого результата будет $s/\sqrt{n}$, то есть

$$s_{\bar{x}}=\frac{s}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\ . \qquad (4.12)$$

Это означает, что усреднение результатов многократных измерений неизменной во времени величины небесполезно, поскольку представляет собой фильтрацию случайных погрешностей и помех.

Точечные оценки границ интерквантильного промежутка J_P, в котором содержится не менее P-й доли всех возможных значений случайной составляющей погрешности результатов однократных измерений, определяются по выборочной функции распределения. На рис. 4.8 показан пример определения границ промежутка J_P, для P = 0.7, который содержит 70 % значений случайных погрешностей измерений. Этот факт подтверждается материалом разд. 4.2.1, где было установлено, что

$$P(a<\xi\le b)=F(b)-F(a).$$

Из рис. 4.8 видно, что из-за ступенчатого вида выборочной функции распределения точечными оценками границ подобных промежутков для любых значений P всегда будут выборочные значения, они же — члены вариационного ряда

$$\tilde{J}_p=\left[x_{(k)},x_{(n-r)}\right]. \qquad (4.13)$$

Если сдвинуть этот промежуток по оси абсцисс на значение оценки $\bar{x}$, получим искомые точечные оценки границ интервала J_P, содержащего только случайную составляющую погрешности однократных измерений:

$$\tilde{J}_P = \left[x_{(k)} - \bar{x},\, x_{(n-r)} - \bar{x}\right]. \tag{4.14}$$

Из этого же рисунка видно также, что для уверенного определения границ промежутка J_P, соответствующего вероятности P, достаточно близкой к 1, необходимо, чтобы величина скачков выборочной функции распределения была не больше значения $(1 - P)/2$: $1/n \le (1 - P)/2$, откуда следует, что количество измерений, которые требуется выполнить для получения уверенных значений границ промежутка J_P, должно удовлетворять условию:

$$n \ge 2/(1 - P).$$

Например, если $P = 0.95$, то $n \ge 40$. Такое значительное количество измерений есть «плата» за то, что здесь не используется такая богатая информация, как информация о плотности распределения вероятностей случайной составляющей погрешности.

Рассмотренные только что точечные оценки границ интерквантильного промежутка не требуют сведений о виде плотности распределения и не используют значений параметров плотности распределения. Такие оценки являются *непараметрическими оценками*. В качестве непараметрических оценок выступают выборочные значения случайной величины, полученные в результате опыта, испытания.

Если же вид плотности распределения случайной величины (погрешности средства измерений или результата измерений) известен, то *точечные оценки* искомых границ можно получить при меньшем объеме выборки, достаточном для точечной оценки среднеквадратического значения погрешности. В этих условиях для плотностей распределений, приведенных в разд. 4.2.2, и вероятности $P = 0.95$ можно записать:

- для плотности нормального распределения

$$\tilde{g} = 1.96s, \quad \tilde{J}_{0.95} = [-1.96s, +1.96s], \tag{4.15}$$

- для плотности равномерного распределения

$$\tilde{g} = 1.65s, \quad \tilde{J}_{0.95} = [-1.65s, +1.65s], \tag{4.16}$$

- для плотности треугольного распределения

$$\tilde{g} = 2.4s, \quad \tilde{J}_{0.95} = [-2.4s, +2.4s], \tag{4.17}$$

- для плотности распределения ARCSIN

$$\tilde{g} = 1.41s, \quad \tilde{J}_{0.95} = [-1.41s, +1.41s], \tag{4.18}$$

где $\tilde{g}$ — точечные оценки полуширины g промежутков J_P, показанных на рис. 26, s — точечная оценка среднеквадратического значения σ случайной погрешности.

Оценки (4.15) – (4.18) являются *параметрическими оценками*, поскольку они вычисляются через оценки параметров плотностей распределений, и для их применения необходима информация о виде плотности распределения.

Понятно, что, если в качестве результата определения систематической погрешности или результата измерения величины x принять $\bar{x}$, то ширина интервала неопределенности уменьшится примерно в $\sqrt{n}$ раз. В частности, в случае, когда погрешности результатов однократных измерений распределены нормально, тогда точечные оценки границ интервала J_P, соответствующего вероятности $P = 0.95$, будут:

$$\tilde{J}_{0.95} = \left[-1.96\frac{s}{\sqrt{n}}, +1.96\frac{s}{\sqrt{n}}\right], \tag{4.19}$$

В силу того, что плотность распределения суммы независимых случайных величин с увеличением их количества стремится к плотности нормального распределения, то, уже начиная с $n = (10 \div 15)$ оценки (4.19), могут быть применены независимо от вида плотности распределения случайной составляющей погрешности.

4.4.2. Оценки характеристик погрешности средств измерений

В соответствии с действующими метрологическими нормативными документами характеристики погрешности определяются и контролируются в отдельных точках диапазона измерений, которые обычно указываются в разделе «Методы и средства поверки» технических условий и (или) стандартов на испытуемые средства измерений.

При метрологических испытаниях средств измерений (при поверке или калибровке) эксперимент осуществляется таким образом, что в результате формируется массив выборочных значений погрешности в каждой из заданных точек диапазона (шкалы). Каждый элемент этого массива есть разность между показанием (или выходным сигналом) испытуемого средства измерения и показанием (выходным сигналом) образцового средства измерения (эталона, меры, калибратора), точность которого, по крайней мере, в три – пять раз выше. Таким образом, в каждой точке диапазона измерений исходным материалом для обработки служат выборочные значения $\Delta_1, \Delta_2, ..., \Delta_n$, из которых затем составляется вариационный ряд $\Delta_{(1)}, \Delta_{(2)}, ..., \Delta_{(n)}$. В этих значениях содержатся обе составляющие: систематическая и случайная. По этим значениям строится выборочная функция распределения и гистограмма, которые служат для идентификации вида плотности распределения случайной составляющей погрешности и для оценки некоторых ее характеристик. По выборочным значениям погрешностей вычисляются точечные оценки характеристик погрешности средства измерений:

$$\overline{\Delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i , \qquad s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\Delta_i - \overline{\Delta})^2} . \tag{4.20}$$

Оценки $\overline{\Delta}$ и s могут быть вычислены также и по гистограмме по аналогии с (4.8), (4.10).

Среднее арифметическое значение $\overline{\Delta}$ — точечная оценка систематической составляющей погрешности Δ_c средства измерений, s — оценка среднеквадратического значения σ случайной составляющей погрешности средства измерений. В ряде случаев для точечного оценивания систематической составляющей погрешности используются выборочная медиана $\tilde{\Delta}_{\text{med}}$ или средина размаха $\Delta_{\text{ср}}$. Точечные параметрические оценки границ промежутка J_P вычисляются по формулам (4.15) – (4.18) и в общем виде могут быть выражены следующим образом:

$$\tilde{J}_P = [-k\,s, +k\,s]\ ,$$

где k — множитель, зависящий от значения вероятности P и от вида закона распределения погрешности, $k\,s = \tilde{g}$ — полуширина промежутка $\tilde{J}_P$,

В случаях, когда погрешность средства измерений нормируется без разделения на систематическую и случайную составляющие, определению подлежат границы промежутка J_P. В качестве оценки $\tilde{g}$ полуширины этого промежутка принимают наибольшее по модулю значение:

- при непараметрическом оценивании

$$\tilde{g}_{\max} = \max\left[\left|\Delta_{(1+k)}\right|, \left|\Delta_{(n-r)}\right|\right], \tag{4.21}$$

- при параметрическом оценивании

$$\tilde{g}_{\max} = \max\left[\left|\overline{\Delta} - k\,s\right|, \left|\overline{\Delta} + k\,s\right|\right], \tag{4.22}$$

В указанных случаях оценка промежутка J_P есть симметричный относительно начала координат промежуток $\tilde{J}_P = [-\tilde{g}_{\max}, +\tilde{g}_{\max}]$, показанный на рис. 4.3. Метрологические нормативные документы допускают запись таких промежутков в виде $\pm\tilde{g}_{\max}$

4.4.3. Экспериментальное определение статической характеристики преобразования измерительных преобразователей

ГОСТ 8.009 [3] предписывает нормировать и представлять статическую характеристику преобразования измерительных преобразователей в форме таблицы, или графика, или функции. В качестве функционального представления чаще всего используется зависимость выходного сигнала y от входного сигнала x: $y = f(x)$. При таком представлении метрологический эксперимент выполняется методом «по мере». Более корректным методом является метод «по образцовому прибору» (см. разд. 1.6), но он применим, если статическая характеристика преобразования представлена зависимостью $x = g(y)$, то есть функцией, обратной функции $f(x)$. Кроме повышения точности отсчетов погрешности такое представление этой характеристики и метод ее определения хороши тем, что если x — измеряемая величина, а y — выходной сигнал, то для нахождения измеряемой величины не нужно решать уравнения $y = f(x)$, а достаточно вычислить функцию $x = g(y)$. Кроме того в этом случае характеристики погрешности приведены ко входу, а именно, к измеряемой величине.

Метрологический эксперимент по определению статической характеристики преобразования выполняется следующим образом.

Назначаются значения $x_1, x_2, ..., x_k$, которые требуется устанавливать на входе испытуемого преобразователя, чтобы при этих значениях измерить значения выходного сигнала. Обычно в нормативных документах эти значения расположены равномерно в диапазоне измерения в количестве $k = 6$ значений, включая ноль. Если ноль расположен внутри диапазона посередине его, то назначаются $k = 11$ равномерно расположенных значений входного сигнала. В особых случаях могут быть назначены иные значения входного сигнала.

а) *Если предполагается, что случайные погрешности пренебрежимо малы,* то при каждом значении входного сигнала x_j выполняются однократные измерения выходного сигнала на прямом y_{1j} и на обратном ходе y_{2j}, как это описано в разд. 1.6. Вычисляется k средних значений выходного сигнала: $\bar{y}_j = 0.5\left(y_{1j} + y_{2j}\right)$. В результате статическая характеристика преобразования получена в виде таблицы. По полученным точкам может быть построен график характеристики преобразования. Погрешности полученной таким образом характеристики регистрируются, как инструментальные основные погрешности и включают в свой состав вариацию (если разница между y_{1j} и y_{2j} существенна) и погрешность, внесенная образцовыми средствами измерений: многозначной мерой или калибратором входного сигнала и средством измерения выходного сигнала.

При необходимости функционального представления статической характеристики преобразования следует выполнить аппроксимацию полученных экспериментальных данных. Обычно в качестве аппроксимирующей функции выбирают степенной или обобщенный полином. Такие полиномы удобны тем, что их коэффициенты входят в эти полиномы линейно. Кроме того при обычной гладкости реальных характеристик преобразования они могут быть представлены полиномами сколь угодно точно (по теореме Вейерштрасса).

Рассмотрим технику полиномиальной аппроксимации экспериментальных значений с помощью степенных полиномов.

Итак, результаты метрологического эксперимента представляются в прямоугольной системе координат на плоскости точками с координатами

$$\left(x_1, \bar{y}_1\right), \left(x_2, \bar{y}_2\right), \ldots, \left(x_k, \bar{y}_k\right).$$

Стремление аппроксимировать эти точки степенным полиномом степени q < (k - 1) записывается в виде

$$
\begin{aligned}
&a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \ldots + a_q x_1^q = \bar{y}_1 + \varepsilon_1 \\
&a_0 + a_1 x_2 + a_2 x_2^2 + \ldots + a_q x_2^q = \bar{y}_2 + \varepsilon_2 \\
&. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\
&a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2 + \ldots + a_q x_k^q = \bar{y}_k + \varepsilon_k
\end{aligned}, \qquad (4.23)
$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_k$ — абсолютные погрешности, с которыми желательно выполнить аппроксимацию. Предельные значения этой погрешности задаются для ограничения степени и, соответственно, количества коэффициентов аппроксимирующего полинома. Задача аппроксимации будет выполнена, когда по экспериментальным данным будут определены значения коэффициентов в (4.23).

Для получения формул, удобных для вычисления коэффициентов, перепишем систему уравнений (4.23) в векторно – матричной форме:

$$
\mathbf{Xa} = \bar{\mathbf{y}}_\varepsilon, \qquad \bar{\mathbf{y}}_\varepsilon = \bar{\mathbf{y}} + \boldsymbol{\varepsilon},
$$

где

$$
\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & \ldots & x_1^q \\ 1 & x_1 & \ldots & x_2^q \\ . & . & . & . \\ 1 & x_1 & \ldots & x_k^q \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ . \\ a_q \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{y}} = \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ . \\ \bar{y}_k \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ . \\ \varepsilon_k \end{pmatrix}.
$$

Поскольку количество k уравнений в (4.23) и, соответственно, количество строк в матрице **X** больше количества неизвестных (q - 1), оценки коэффициентов вычисляются по формуле

$$
\hat{\mathbf{a}} = \left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Delta}^{-1} \mathbf{X}\right)^{\mathrm{T}} \mathbf{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Delta}^{-1} \bar{\mathbf{y}}, \qquad (4.24)
$$

где $\boldsymbol{\Delta}$ — диагональная матрица размера $k \times k$, в диагонали которой расположены значения $\Delta_{\varepsilon j}^2$ — квадраты задаваемых предельных значений погрешностей аппроксимации ε_j.

Задача определения коэффициентов аппроксимирующего полинома является плохообусловленной задачей. Характеристикой обусловленности является число обусловленности матрицы $\left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Delta}^{-1} \mathbf{X}\right)^{\mathrm{T}}$.

Из линейной алгебры известно, что число обусловленности этой матрицы, а именно, $\mathrm{cond}\left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta}^{-1}\mathbf{X}\right)^{\mathrm{T}}$ монотонно увеличивается с увеличением числа столбцов в матрице **X.** Это значит, что по этой причине ухудшается обусловленность задачи. Для регуляризации вычисления вектора коэффициентов аппроксимирующего полинома процедура аппроксимации должна быть последовательной и начинаться с попытки аппроксимации экспериментальных значений полиномом низшей степени, например, с $q = 1$.

Алгоритм аппроксимации:

1. Задание значений предельных погрешностей аппроксимации $\Delta_{\varepsilon i}$.

2. Формирование матрицы **Δ.**

3. q = 1.

4. Формирование матрицы **X**.

5. Вычисление вектора коэффициентов $\hat{\mathbf{a}} = \left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta}^{-1}\mathbf{X}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta}^{-1}\bar{\mathbf{y}}$.

6. Вычисление значений аппроксимирующего полинома с найденными значениями коэффициентов в точках $x_1, x_2, ..., x_k$: $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\mathbf{a}}$.

7. Проверка соответствия точности выполненной аппроксимации и заданной точности при всех значениях $x_1, x_2, ..., x_k$.

Если хотя бы при одном значении x_j окажется, что $\left|\hat{y}_j - \bar{y}_j\right| > \Delta_{\varepsilon i}$, тогда степень полинома увеличивается на единицу, $q = q + 1$, *переход на 4.*

Если при всех значениях $x_1, x_2, ..., x_k$ окажется, что $\left|\hat{y}_j - \bar{y}_j\right| \le \Delta_{\varepsilon i}$, *переход на 8*.

8. Конец.

Вычислительная устойчивость этого алгоритма обеспечивается за счет того, что, во-первых, на каждом предыдущем шаге число обусловленности меньше, чем на последующем, и, во-вторых, остановка по достижении требуемой точности разумно ограничивает рост степени аппроксимирующего полинома, а, следовательно, ухудшение обусловленности.

б) *Рассмотрим теперь ситуацию, когда случайным разбросом результатов измерений пренебречь нельзя.*

При наличии у испытуемого преобразователя случайных погрешностей, а значит, и случайного разброса результатов измерений выходного сигнала выполняются многократные измерения выходного сигнала при каждом значении сигнала x_j на входе преобразователя. Эксперимент должен быть построен так, чтобы обеспечить статистическую независимость результатов измерений.

Таким образом, при выполнении n повторных измерений при каждом значении x_j всего будет получено k выборок результатов измерений выходного сигнала: $y_{1j}, y_{2j}, ..., y_{nj}$ объема n каждая.

По этим выборочным данным вычисляются средние арифметические и оценки дисперсии:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_{ij}, \qquad s_j^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}_j\right)^2 .$$

Из средних арифметических составляется вектор $\bar{\mathbf{y}}$, а оценки дисперсии образуют диагональ матрицы $\mathbf{\Sigma}$:

$$\bar{\mathbf{y}} = \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ \cdot \\ \bar{y}_k \end{pmatrix}, \qquad \Sigma = \begin{pmatrix} s_1^2 & 0 & ... & 0 \\ 0 & s_2^2 & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & s_k^2 \end{pmatrix}.$$

Оценки коэффициентов вычисляются по формуле, аналогичной (4.24):

$$\hat{\mathbf{a}} = \left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{X}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Sigma}^{-1}\bar{\mathbf{y}} . \qquad (4.25)$$

Оценки (4.25) являются статистическими оценками наименьших квадратов (МНК – оценками). Для получения устойчивых оценок алгоритм аппроксимации аналогичен предыдущему, за исключением того, что для его остановки применяется проверка статистической гипотезы о том, что смещение, вызванное недостаточностью степени аппроксимирующего полинома, незначительно по сравнению с погрешностью результатов измерений.

Алгоритм аппроксимации:

1. Формирование матрицы **Σ**.

2. q = 1.

3. Формирование матрицы **X**.

4. Вычисление вектора коэффициентов $\hat{\mathbf{a}} = \left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{X}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Sigma}^{-1}\overline{\mathbf{y}}$.

5. Вычисление значений аппроксимирующего полинома с найденными значениями коэффициентов в точках $x_1, x_2, ..., x_k$: $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\mathbf{a}}$.

6. Проверка статистической гипотезы о соответствии точности выполненной аппроксимации и погрешности измерений при всех значениях $x_1, x_2, ..., x_k$.

Если

$$\frac{n-1}{k-q-1}\left(\mathbf{X}\hat{\mathbf{a}} - \overline{\mathbf{y}}\right)^{\mathrm{T}}\Sigma^{-1}\left(\mathbf{X}\hat{\mathbf{a}} - \overline{\mathbf{y}}\right) > F_{\alpha}(k-q-1, n-1),$$

степень полинома увеличивается на единицу, $q = q + 1$, *переход на 3*.

В противном случае *переход на 7*.

7. Конец.

В этом алгоритме $F_{\alpha}(k-q-1, n-1)$ — квантиль распределения Фишера с числом степеней свободы $(k-q-1)$ и $(n-1)$, соответствующая уровню значимости α (вероятности ошибки первого рода).

Полученный аппроксимирующий полином фиксируется, как номинальный, и основная инструментальная погрешность в этом случае отсчитывается от этого полинома:

$$\Delta_{ij} = y_{ij} - \hat{a}_0 - \hat{a}_1 x_j - \hat{a}_2 x_j^2 - ... - \hat{a}_q x_j^q.$$

Таким путем при каждом значении x_j получается выборка значений погрешности $\Delta_{1j}, \Delta_{2j}, ..., \Delta_{nj}$, по элементам которой вычисляются характеристики основной погрешности в соответствии с разд. 4.5.4.

На практике может сложиться следующая ситуация. Если испытуемый преобразователь, калибратор и образцовое средство измерений обладают очень малыми погрешностями, то степень аппроксимирующего полинома может оказаться неприемлемо высокой. Степень полинома может быть уменьшена путем увеличения элементов диагонали матрицы $\mathbf{\Sigma}$ на этапе 1**,** и поскольку проверка гипотезы, применяемая в разделе 6 алгоритма, направлена на сопоставление погрешности аппроксимации с элементами матрицы $\mathbf{\Sigma}$**,** положительное решение по этому сопоставлению возникнет раньше, при меньшей степени полинома. Это регулирование степени полинома следует выполнять методом проб и ошибок.

4.5. ИНТЕРВАЛЬНОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ

4.5.1. Понятие о доверительных интервалах

Недостаток точечных оценок заключается в том, что они не дают достаточной информации о том, насколько далеки эти оценки от действительных значений искомых характеристик. Гораздо более полную информацию о действительных значениях оцениваемых величин и характеристик содержат *интервальные оценки*, каковыми являются *границы доверительных интервалов*.

Доверительный интервал — интервал, который накрывает действительное значение оцениваемой величины с заданной вероятностью Q**.**

Вероятность Q называется *доверительной вероятностью* и назначается в пределах от 0.8 до 0.95 в зависимости от условий каждой конкретной задачи.

Слишком малое значение доверительной вероятности снижает доверие к результатам измерений. С другой стороны, слишком большое значение доверительной вероятности приводит к существенному расширению доверительного интервала, и в пределе при $Q = 1$ доверительным интервалом оказывается вся ось вещественных чисел, ибо в условиях действия случайных факторов об оцениваемой величине достоверно можно предположить лишь, что ее значение лежит где-то на числовой оси.

Границы доверительных интервалов случайны, поскольку они не могут быть определены иначе, чем путем обработки данных, возмущенных действием случайных факторов. В связи с этим доверительный интервал можно интерпретировать, как некий отрезок случайной длины, брошенный случайным образом на числовую ось так, что он накрывает действительное значение оцениваемой величины с доверительной вероятностью Q.

В метрологической практике доверительные интервалы применяют для определения:

- значения систематической составляющей погрешности средства измерений (то есть математического ожидания погрешности средства измерений),

- значения измеряемой величины (на языке математической статистики — математического ожидания результатов многократных измерений),

- среднеквадратического значения случайной составляющей погрешности средства измерения или результата измерения,

- интервала J_P, в котором содержится не менее P-й доли всех возможных значений случайной составляющей погрешности средств измерений или результатов измерений.

4.5.2. Доверительные интервалы для систематической составляющей погрешности средства измерений и для значения измеряемой величины

Точечная оценка математического ожидания результатов многократных измерений неизменяющейся измеряемой величины является оценкой суммы истинного значения измеряемой величины x и систематической погрешности $\Delta_c x$.

Если плотность распределения случайной составляющей погрешности измерений есть плотность нормального распределения или близка к ней, то границы доверительного интервала, накрывающего действительное значение суммы $x + \Delta_c x$ с вероятностью Q, вычисляются по формулам

$$\bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1), \quad \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1), \tag{4.26}$$

где $\bar{x}$ и s — оценки, вычисляемые по формулам разд. 4.4.1,

$t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1)$ — коэффициент Стьюдента, таблицы значений которого приводятся практически во всех учебниках и справочниках по математической статистике. Ниже в табл. 4.1 приведена выписка из этих таблиц.

Таким образом, по определению доверительного интервала,

$$P\left(\bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1) \le x + \Delta_c x \le \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1) \right) = Q. \tag{4.27}$$

В случае отсутствия систематической составляющей погрешности доверительный интервал с границами (4.27) есть не что иное, как интервал неопределенности истинного значения измеряемой величины. Как видно из формулы (4.27), с увеличением n ширина доверительного интервала уменьшается, стремясь в пределе к нулю. Это обстоятельство свидетельствует о том, что увеличение количества измерений и усреднение результатов небесполезно. Систематическая погрешность не изменяется при усреднении результатов измерений.

Таблица 4.1

Коэффициенты Стьюдента $t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1)$

Q \ n	4	5	6	8	10	12	14	16	18	. . .	∞
0.8	1.64	1.53	1.48	1.41	1.38	1.36	1.35	1.34	1.33	. . .	1.29
0.95	3.18	2.78	2.57	2.36	2.26	2.20	2.16	2.13	2.11	. . .	1.96

Границы доверительного интервала для систематической составляющей погрешности средства измерений определяются при его метрологических испытаниях по выборочным значениям погрешности в соответствии с приведенными формулами и с заменой x на Δ. В результате будут получены нижняя $\Delta_{\text{сн}}$ и верхняя $\Delta_{\text{св}}$ границы доверительного интервала, который с вероятностью Q накрывает действительное значение систематической составляющей погрешности средства измерений:

$$P\left(\overline{\Delta}-\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1)\le\Delta_c\le\overline{\Delta}+\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1)\right)=P(\Delta_{\text{сн}}\le\Delta_{\text{с}}\le\Delta_{\text{св}})=Q, \quad (4.28)$$

где точечные оценки $\overline{\Delta}$ и s вычисляются по формулам (4.8), (4.10) и (4.20).

4.5.3. *Доверительные интервалы для среднеквадратического значения случайной составляющей погрешности*

Все действия и формулы, необходимые для построения доверительных интервалов, накрывающих действительное среднеквадратическое значение σ случайной составляющей погрешности средств измерений и результатов измерений, полностью идентичны. Различие состоит только в обозначениях.

Вычисление границ доверительного интервала для σ основано на том, что если плотность распределения случайной составляющей погрешности нормальна, то плотность распределения величины $\frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$, есть плотность распределения $\chi^2(n-1)$ с (n - 1) степенью свободы, где s — несмещенная оценка σ по формуле (4.10). График плотности распределения «хи-квадрат» представлен на рис. 4.10. На этом графике приведены квантили распределения, соответствующие вероятностям α и $(1-\alpha)$:

$$P\left(\frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \le \chi^2_{\alpha}(n-1)\right) = \alpha, \qquad P\left(\frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \le \chi^2_{1-\alpha}(n-1)\right) = 1-\alpha.$$

Рис. 4.10. Расположение квантилей распределения «хи-квадрат»

Вероятность того, что случайная величина $(n-1)s^2/\sigma^2$ находится внутри промежутка между этими квантилями, равна:

$$P\left(\chi_{\alpha}^{2} < \frac{(n-1)s^{2}}{\sigma^{2}} \le \chi_{1-\alpha}^{2}\right) = 1 - 2\alpha .$$

Для того, чтобы обеспечить эту вероятность равную доверительной вероятности 1-2α = Q, необходимо, чтобы $\alpha = (1 - Q)/2$ и $1 - \alpha = (1 + Q)/2$.

Поэтому

$$P\left(\chi_{\frac{1-Q}{2}}^{2}(n-1) \le \frac{s^{2}(n-1)}{\sigma^{2}} \le \chi_{\frac{1+Q}{2}}^{2}(n-1)\right) = Q , \tag{4.29}$$

Значения квантилей $\chi_{\frac{1-Q}{2}}^{2}(n-1), \chi_{\frac{1+Q}{2}}^{2}(n-1)$ выбираются из таблиц математической статистики, фрагмент которых приведен ниже в табл. 4.2.

Преобразуя неравенство, стоящее внутри скобок формулы (4.29), получим нижнюю $\sigma_{н}$, и верхнюю $\sigma_{в}$ границы доверительного интервала, накрывающего значение σ с доверительной вероятностью Q**:**

$$P\left(s\sqrt{\frac{n-1}{\chi_{\frac{1+Q}{2}}^{2}(n-1)}} \le \sigma \le s\sqrt{\frac{n-1}{\chi_{\frac{1-Q}{2}}^{2}(n-1)}}\right) = P(\sigma_{н} \le \sigma \le \sigma_{в}) = Q ,$$

Таблица 4.2

Значения $\chi_{1-Q}^{2}(n-1)$

Q \ n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Q = 0.8	0.45	1.0	1.65	2.34	3.07	3.82	4.6	5.38	6.18	6.99	7.81
Q = 0.95	0.1	0.35	0.71	1.14	1.63	2.17	2.73	3.32	3.94	4.57	5.23

Поскольку $\sigma \ge 0$, и поскольку при поверке проверяется факт непревышения среднеквадратическим отклонением некоторого порогового значения d, нас будет интересовать только верхняя граница доверительного интервала $\sigma_в$. Значение этой верхней границы для σ определяется из неравенства, стоящего в круглых скобках предыдущего выражения справа:

$$P\left(0 \le \sigma \le s\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{1-Q}(n-1)}}\right) = P(0 \le \sigma \le \sigma_в) = Q.$$

Если окажется, что

$$s\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{1-Q}(n-1)}} > d,$$

делается вывод о непригодности средства измерений к применению. В противном случае средство измерений признается пригодным к применению. Вероятность принятия ошибочного решения в этом случае не превысит $(1-Q)$.

4.5.4. Доверительный интервал для промежутка J_P, в котором содержится P-я доля всех возможных значений случайной составляющей погрешности средств измерений или результатов измерений

Задача состоит в том, чтобы построить доверительный интервал $\hat{J}(P,Q)$, который должен накрывать действительный промежуток J_P с вероятностью Q, то есть

$$P\left(J_P \subseteq \tilde{J}(P,Q)\right) = Q.$$

Границы доверительного интервала $\hat{J}(P,Q)$ для J_P называются *толерантными пределами*. Мы рассмотрим метод построения *параметрических* и *непараметрических толерантных пределов*. Параметрические толерантные пределы могут быть построены при условии, что плотность распределения случайной составляющей погрешности нормальна. Непараметрические толерантные пределы не зависят от вида плотности распределения, но за это требуют увеличения объема выборки, то есть увеличения трудоемкости.

Следует заметить, что с помощью толерантных пределов оценивается характеристика случайной составляющей погрешности результатов однократных измерений и что с *увеличением объема выборки ширина доверительного интервала* $\hat{J}(P,Q)$ *к нулю не стремится*, его границы (толерантные пределы), сближаются друг с другом и приближаются к границам промежутка J_P извне.

Поскольку погрешности нормируются и представляются промежутками J'_P, симметричными относительно нуля, то доверительные интервалы для них будут также симметричными.

Параметрические толерантные пределы. Параметрические толерантные пределы для случайной составляющей погрешности результата измерений или средства измерений суть границы интервала:

$$\hat{J}(P,Q) = [-s \cdot \kappa(n, P, Q), s \cdot \kappa(n, P, Q)] ,$$

где s — оценка σ, вычисляемая по формуле (4.10), $\kappa(n,P,Q)$ — толерантный множитель, таблица значений которого приведена в книге Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов «Таблицы математической статистики».- М.: ВЦ АН СССР, 1968 г.

Ниже в табл. 4.3 приведены значения толерантного множителя для P = 0.95.

Таблица 4.3

Толерантный множитель $\kappa(n, 0.95, Q)$

Q \ n	3	4	5	6	7	8	9	10
0.8	5.09	3.935	3.44	3.167	2.98	2.86	2.77	2.69
0.95	9.916	6.370	5.079	4.414	4.007	3.732	3.532	3.379

Пользуясь выражением для симметричных интервалов, запишем интервал $\hat{J}(P,Q)$ в виде $\pm s \cdot \kappa(n, P, Q)$.

Фактически здесь получена верхняя граница $\hat{g}$ доверительного интервала для полуширины g симметричного интервала J_P: $\hat{g} = s \cdot \kappa(n, P, Q)$. Из сравнения полученной интервальной оценки с точечной оценкой (формула (4.15), разд. 4.4.2) видно, что всегда $\hat{g} > \tilde{g}$. Этого следовало ожидать, поскольку оценка, полученная здесь, дает право записать равенство

$$P\left(J_P \subseteq \left[-\hat{g}, +\hat{g}\right]\right) = P\left(J_P \subseteq \left[-s\,\kappa(n,P,Q), +s\,\kappa(n,P,Q)\right]\right) = Q,$$

В случаях, когда по обоснованным соображениям даже при существенной случайной составляющей погрешность средства измерений нормируется без разделения на систематическую и случайную составляющие (см. разд. 4.2.2 и рис. 4.3), в качестве оценки $\hat{g}'$ полуширины g' интервала J'_P, показанного на рис. 4.3, принимают наибольшее по модулю значение:

$$\hat{g}_{\max} = \max\left[\left|\overline{\Delta} - s\,\kappa(n,P,Q)\right|, \left|\overline{\Delta} + s\,\kappa(n,P,Q)\right|\right],$$

В указанных случаях оценка такого интервала J'_P есть симметричный относительно начала координат интервал $\hat{J}(P,Q) = \left[-\hat{g}_{\max}, +\hat{g}_{\max}\right]$.

Непараметрические толерантные пределы. Непараметрическими точечными оценками границ промежутка J_P в выражениях (4.13), (4.14) являлись члены вариационного ряда с исключенной оценкой математического ожидания, то есть выборочные значения случайной составляющей погрешности. Кроме того, как показано в разд. 4.3.2 (формула (4.7)), вероятностная мера промежутка между каждой парой соседних выборочных значений случайной величины (случайной погрешности) при любом исходном распределении равна $1/n$. Поэтому все промежутки

$$\left(-\infty, x_{(1)}\right], \left(x_{(1)}, x_{(2)}\right], \ldots, \left(x_{(n-1)}, x_{(n)}\right]$$

называются в математической статистике *статистически эквивалентными блоками*. Мы имеем право считать вероятностную меру промежутка $\left(x_{(r+1)}, x_{(n-r)}\right)$, содержащего $(n-2r-1)$ статистически эквивалентных блоков, точечной оценкой вероятности того, что

$$\tilde{P}\left(x_{(r+1)} < \xi \le x_{(n-r)}\right) = \frac{1}{n}(n-2r-1). \qquad (4.30)$$

Было сказано о недостаточной информативности точечных оценок, поэтому и здесь следует перейти к нахождению границ доверительного интервала для истиной вероятностной меры указанного промежутка. При этом верхняя граница доверительного интервала нам не интересна. Мы знаем, что она не будет превышать единицу. Важнее знать нижнюю границу доверительного интервала для этой вероятности, поскольку с риском $\alpha = 1 - Q$ нам нужно быть уверенными в том, что не менее P-й доли генеральной совокупности погрешностей находится внутри промежутка (4.30). В математической статистике получено уравнение для нахождения нижней границы $P_{\text{н}}$ такого доверительного интервала:

$$\sum_{m=n-2r-1}^{n} C_n^m P_{\text{н}}^m \left(1 - P_{\text{н}}\right)^{n-m} = 1 - Q, \qquad (4.31)$$

и для обеспечения обозначенной уверенности необходимо, чтобы $P_{\text{н}} = P$. Только в этом случае, когда истинное значение вероятности с вероятностью Q окажется внутри доверительного интервала, то есть будет больше, чем P, эта уверенность будет подтверждена.

Итак, в уравнении (4.31) значение $P_{\text{н}}$ задано. Поэтому решение уравнения (4.31) окажется минимальным количеством испытаний n, которые необходимо выполнить, чтобы иметь возможность обеспечить требуемые вероятности при заданном количестве блоков $2r$-1, оставшихся вне промежутка $\left(x_{(r)}, x_{(n-r)}\right)$. Например, если $r = 1$, границами непараметрических толерантных пределов окажутся крайние члены вариационного ряда. Такие толерантные пределы не будут симметричными относительно среднего значения. Кроме того на такие толерантные пределы будут сильно влиять грубые промахи измерений, импульсные помехи и тому подобные возмущения.

С целью достижения симметрии толерантных пределов относительно среднего имеет смысл использовать вариационный ряд, составленный из модулей разностей $|x_i - \bar{x}|$ или $|\Delta_i - \overline{\Delta}|$. В этом случае толерантными пределами будут положительные и отрицательные значения одного и того же члена нового вариационного ряда, составленного из указанных модулей, то есть

$$|x_i - \bar{x}|_{(n-r)} \qquad \text{или} \qquad |\Delta_i - \overline{\Delta}|_{(n-r)}.$$

При $r = 0$ таким пределом будет последний член нового вариационного ряда, подверженный сильному влиянию грубых промахом и импульсных помех. Чтобы застраховаться от этого влияния, нужно принять $r = 1$ (страховка от однократной помехи), $r = 2$ (страховка от двукратной помехи) и так далее. Здесь r — количество статистически эквивалентных блоков, оставшихся вне промежутков

$$\left(0, |x_i - \bar{x}|_{(n-r)}\right) \qquad \text{или} \qquad \left(0, |\Delta_i - \overline{\Delta}|_{(n-r)}\right).$$

Выполненное преобразование вариационного ряда приводит к необходимости решать относительно n не уравнение (4.31), а несколько иное:

$$\sum_{m=n-r}^{n} C_n^m P_{\text{н}}^m \left(1 - P_{\text{н}}\right)^{n-m} = 1 - Q. \tag{4.32}$$

Тогда в качестве непараметрических толерантных пределов для случайной составляющей погрешности измерений целесообразно использовать члены вариационного ряда, симметричные по своему расположению относительно среднего арифметического:

$$\hat{J}(P,Q) = \left[-|x_i - \bar{x}|_{(n-r)}, |x_i - \bar{x}|_{(n-r)}\right].$$

Непараметрические толерантные пределы для случайной составляющей погрешности *средств измерений,* симметричные относительно оценки систематической погрешности:

$$\hat{J}(P,Q) = \left\lfloor -\left|\Delta_i - \overline{\Delta}\right|_{(n-r)}, \left|\Delta_i - \overline{\Delta}\right|_{(n-r)} \right\rfloor.$$

Если погрешности средства измерений предполагается нормировать без разделения на систематические и случайные, составляется вариационный ряд из модулей выборочных значений погрешностей

$$\left|\Delta_{i1}\right|_{(1)}, \left|\Delta_{i2}\right|_{(2)}, \ldots, \left|\Delta_{in}\right|_{(n)}$$

и в этом случае толерантные пределы будут симметричны относительно нуля

$$\hat{J}(P,Q) = \left\lfloor -\left|\Delta_i\right|_{(n-r)}, \left|\Delta_i\right|_{(n-r)} \right\rfloor. \tag{4.33}$$

При использовании непараметрических толерантных пределов, не зависящих от вида закона распределения погрешностей, за это преимущество приходится «платить» трудоемкостью эксперимента. Причем эта трудоемкость возрастает при стремлении застраховаться от влияния грубых промахов измерений и действия импульсных помех. Количественно эта трудоемкость выражается в числе минимально необходимого объема выборки.

В табл. 4.4 приведены результаты численного решения уравнения (4.32) которые есть значения минимально необходимого объема выборки, обеспечивающего заданную достоверность определения непараметрических толерантных пределов для вероятности P = 0.95.

Таблица 4.4

Объем выборки, минимально необходимый для определения непараметрических толерантных пределов при P_0 = 0.95

r / Q	0	1	2
0.80	32	59	84
0.95	59	93	124

4.6. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИГОДНОСТИ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

4.6.1. Предварительные соображения

Настоящий раздел в равной степени относится к области теоретической и прикладной метрологии.

Основная задача поверки средства измерений состоит в том, чтобы выполнить метрологические испытания и на основании исхода этих испытаний принять решение о пригодности или непригодности средства измерений к применению. Если случайная составляющая инструментальной погрешности средства измерений отсутствует и разброс результатов многократных измерений, выполняемых при поверке, отсутствует, то при каждом значении измеряемой величины, установленном в методике поверки, производится по одному измерению при прямом и обратном ходе, и полученные значения погрешностей просто сравниваются с установленными нормами. Положительное решение о пригодности средства измерений к применению принимается, если во всех точках характеристики погрешности поверяемого средства измерений соответствуют установленным нормам.

При наличии случайных инструментальных погрешностей или случайного разброса результатов измерений при поверке простое сравнение значений погрешностей с нормами может привести к ошибочному решению. В этой ситуации решение о метрологической пригодности или непригодности средства измерений следует принимать на основе проверки статистических гипотез о характеристиках погрешности.

Если установлена норма Δ_{CH} на систематическую погрешность, то проверяется гипотеза о математическом ожидании:

гипотеза H_0: модуль систематической погрешности меньше установленной нормы Δ_{CH}

против гипотезы H_1: модуль систематической погрешности больше установленной нормы Δ_{CH}.

Если в совокупности с нормой на систематическую погрешность установлена норма на случайную погрешность, то есть на ширину интерквантильного промежутка J_P, проверяется

гипотеза H_0: ширина реального интерквантильного промежутка случайной погрешности меньше установленной нормы

против гипотезы H_1: ширина реального интерквантильного промежутка случайной погрешности больше нормы.

Проверке этой гипотезы эквивалентна проверка гипотезы о вероятности принятия случайной погрешностью значений из нормированного интервала:

H_0: $P \geq P_{\text{норм}}$ вероятность содержания случайной погрешности внутри нормированного промежутка больше установленной вероятности

против H_1 : $P < P_{\text{норм}}$ вероятность содержания случайной погрешности внутри нормированного промежутка меньше установленной вероятности.

Если установлена норма на общую основную погрешность без разделения на систематическую и случайную составляющие, тогда проверяется гипотеза

H_0: ширина реального интерквантильного промежутка меньше нормы

против гипотезы H_1: ширина реального интерквантильного промежутка больше нормы,

или эквивалентная ей гипотеза

H_0: $P \geq P_{\text{норм}}$ вероятность содержания случайной и систематической основной погрешности внутри нормированного промежутка больше установленной вероятности

против H_1 : $P < P_{\text{норм}}$ вероятность содержания случайной и систематической основной погрешности внутри нормированного промежутка меньше установленной вероятности.

Имея в виду случайный характер погрешности и конечный объем выборки ее значений, полученный в процессе поверки, нетрудно предположить о возможности принятия ошибочных решений о пригодности или непригодности средства измерений к применению. Вероятности принятия ошибочных решений выражаются следующими условными вероятностями:

- условной вероятностью отвергнуть гипотезу H_0 при условии, что она на самом деле верна, то есть $P(H_1 / H_0)$,

- условной вероятностью признать гипотезу H_0 справедливой при условии, что на самом деле она не верна, то есть $P(H_0 / H_1)$.

Эти вероятности ошибочных решений в математической статистике имеют специальные обозначения и наименования.

Вероятность $P(H_1 / H_0) = \alpha$ – *риск производителя* или продавца.

Вероятность $P(H_0 / H_1) = \beta$ – *риск потребителя* или покупателя.

Вероятность $1 - P(H_0 / H_1)$ или $1 - \beta$ — мощность критерия проверки гипотезы.

Сформулированные гипотезы являются сложными гипотезами, и проверка этих гипотез традиционными, принятыми в классической математической статистике методами не может обеспечить контроль обоих рисков. Поэтому обычно назначают и обеспечивают только один риск, а именно, α — риск производителя, который в этом случае задается, как *уровень значимости* критерия проверки гипотезы. При этом риск потребителя игнорируется полностью. Это обстоятельство является недостатком в экономическом отношении, поскольку и тот и другой риски наносят ущерб и производителю, и потребителю, а поэтому должны учитываться совместно. Отмеченный недостаток может быть преодолен путем применения к процедуре поверки последовательного метода проверки статистических гипотез совместно с *фидуциальными вероятностями*, понятие о которых ввел выдающийся ученый в области математической статистики сэр Роберт Фишер в 1935 году. Фидуциальные вероятности порождены трактовкой доверительного интервала, которая отличается от классической. Обычно доверительный интервал трактуется, как интервал со случайными границами $B_1(\mathbf{x}), B_2(\mathbf{x})$, накрывающий истинное значение параметра Θ с доверительной вероятностью Q:

$$P(B_1(\mathbf{x}) < \Theta \le B_2(\mathbf{x})) = Q\,, \tag{4.34}$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\mathbf{T}}$ — вектор случайных выборочных значений.

Фишер предложил трактовать формулу (4.34), как вероятность того, что истинное значение параметра Θ находится внутри интервала $(B_1(\mathbf{x}), B_2(\mathbf{x})]$. Такая трактовка вызвала у математиков сомнения, во-первых, потому, что истинное значение параметра, хоть и неизвестно, но оно не случайно и, во-вторых, из-за введения вероятностной меры на интервале со случайными границами. Однако нет сомнения в том, что две формулировки «интервал с границами $(B_1(\mathbf{x}), B_2(\mathbf{x})]$ накрывает истинное значение параметра с вероятностью Q» и «вероятность того, что истинное значение параметра Q находится внутри интервала с границами $(B_1(\mathbf{x}), B_2(\mathbf{x})]$» одинаковы и выражают одну и ту же ситуацию, формально записанную в виде (4.34) и соответствующую значению слова *fiducial*, переводимому с английского языка, как «основанный на вере». Позже, в 70 годах профессор МГУ Г. П. Климов построил непротиворечивую аксиоматику и для фидуциальной вероятностной меры.

Вот эта-то мера и будет нами применена для проверки перечисленных сложных гипотез.

4.6.2. Проверка гипотезы о соответствии норме модуля систематической погрешности

Если о систематической инструментальной погрешности известно, что с вероятностью Q его значение накрыто доверительным интервалом (4.28):

$$\left(\overline{\Delta}-\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1),\overline{\Delta}+\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q}{2}}(n-1)\right], \qquad (4.35)$$

то это значит, что с вероятностью $1-Q$ значение систематической погрешности им не накрыто, и с этой вероятностью истинное значение систематической погрешности находится вне этого интервала. Поэтому, если в результате метрологического эксперимента и обработки данных окажется, что весь доверительный интервал (4.35) лежит целиком внутри интервала $(-\Delta_{\text{CH}},+\Delta_{\text{CH}})$, где Δ_{CH} — предел допускаемой систематической погрешности, то есть, когда

$$\max\left(\left|\overline{\Delta}-\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q_1}{2}}(n-1)\right|,\left|\overline{\Delta}+\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q_1}{2}}(n-1)\right|\right)<\Delta_{\text{CH}}, \qquad (4.36)$$

то не будет достаточных оснований отвергнуть гипотезу H_0 и средство измерений признается пригодным к применению. При этом из-за конечности объема выборки может случиться, что все-таки систематическая погрешность превышает норму, но выборка оказалась такой, что (4.36) выполняется. Тогда отклонение гипотезы H_1 будет ошибочным. Поскольку вероятность того, что истинное значение систематической погрешности лежит вне интервала (4.35), равна $1-Q_1$, тогда вероятность ошибочного решения будет $P(H_0/H_1)=\beta\leq 1-Q_1$ в силу монотонности вероятностной меры.

С другой стороны, если в результате метрологического эксперимента и обработки данных окажется, что весь доверительный интервал (4.35) лежит целиком вне интервала $(-\Delta_{\text{CH}},+\Delta_{\text{CH}})$, где Δ_{CH} — предел допускаемой систематической погрешности, то есть, когда

$$\max\left(\left(\overline{\Delta}-\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q_2}{2}}(n-1)\right),\left(\overline{\Delta}+\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q_2}{2}}(n-1)\right)\right)<-\Delta_{\text{СН}} \qquad (4.37)$$

или

$$\min\left(\left(\overline{\Delta}-\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q_2}{2}}(n-1)\right),\left(\overline{\Delta}+\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\frac{1+Q_2}{2}}(n-1)\right)\right)>+\Delta_{\text{СН}} \qquad (4.38)$$

то не будет достаточных оснований отвергнуть гипотезу H_1 и средство измерений не признается пригодным к применению. При этом из-за конечности объема выборки может случиться, что все-таки систематическая погрешность удовлетворяет норме, но выборка оказалась такой, что (4.37), (4.38) выполняются. Тогда отклонение гипотезы H_0 и бракование средства измерений будет ошибочным. Поскольку вероятность того, что истинное значение систематической погрешности лежит вне интервала (4.35), равна $1-Q_2$, в этом случае вероятность ошибочного решения будет $P(H_1/H_0)=\alpha\leq 1-Q_2$ в силу монотонности вероятностной меры.

Может оказаться, что не выполняется ни (4.36), ни (4.37), ни (4.38). В этой ситуации, поскольку с увеличением объема выборки доверительный интервал сужается, можно увеличить объем выборки (количество повторных измерений) и повторить описанную процедуру вновь. Такой итерационный процесс в конце концов закончится принятием того или иного решения. Если он оказывается чересчур длительным, разумно отправить поверяемое средство на регулировку или в ремонт.

Описанная выше последовательная процедура поверки гарантирует, что вероятности ошибочных решений α и β не будут превышать $1-Q_2$ и $1-Q_1$ соответственно. Конечно, эти значения рисков весьма приблизительные, но они гарантируются. Различные значения α и β обеспечиваются назначением различных значений Q_1 и Q_2. В этих случаях расчет значений границ в (4.36), (4.37), (4.38) выполняется по разному в зависимости от складывающейся ситуации.

4.6.3. Проверка гипотезы о соответствии случайной погрешности норме

Наиболее очевидный способ проверки гипотезы о соответствии установленной норме случайной инструментальной погрешности средства измерений заключается в определении симметричных относительно систематической погрешности непараметрических толерантных пределов и сопоставить их с установленной нормой $\Delta_{\text{норм}}$.

Другой способ может быть основан на том, в большинстве отечественных нормативных документов для вероятности появления значений случайной погрешности в интервале $\left(-\Delta_{\text{норм}}, +\Delta_{\text{норм}}\right)$ принято значение $P_{\text{норм}} = 0{,}95$, то если при поверке обнаружится, что вероятность появления значений случайных погрешностей в пределах нормы превышает 0,95, это будет свидетельствовать о пригодности средства к применению. И напротив, если эта вероятность будет меньше 0,95, то средство измерений не может считаться пригодным к применению. Такая поверка выполняется путем проверки статистической гипотезы о вероятности. Эта гипотеза формулируется следующим образом.

H_0: вероятность нахождения модуля значений случайной погрешности в пределах установленной нормы $\Delta_{\text{норм}}$ больше вероятности $P_{\text{норм}}$

против H_1: вероятность нахождения модуля значений случайной погрешности в пределах установленной нормы $\Delta_{\text{норм}}$ меньше вероятности $P_{\text{норм}}$.

Для проверки этой гипотезы можно использовать фидуциальные вероятности. С этой целью необходимо определить нижнюю и верхнюю границы доверительного интервала для вероятности, как решение уравнений (см. также формулу (4.30)):

- для нижней границы $P_{\text{н}}$

$$\sum_{m=k}^{n} C_n^m P_{\text{н}}^m (1 - P_{\text{н}})^{n-m} = 1 - Q_1,$$

- для верхней границы $P_{\text{в}}$

$$\sum_{m=0}^{k} C_n^m P_{\text{в}}^m (1 - P_{\text{в}})^{n-m} = 1 - Q_2,$$

где k — количество экспериментальных значений случайной погрешности, оказавшихся в пределах нормы, n — объем выборки (количество измерений), Q_1, Q_2 — доверительные вероятности, $\alpha = 1 - Q_2$ — риск производителя или поверителя, $\beta = 1 - Q_1$ — риск потребителя.

Поскольку поверка выполняется в условиях метрологической лаборатории, защищенной от действия влияющих величин, в том числе, от помех, поэтому страховка от возможных помех не требуется.

Средство измерений признается пригодным к применению, если $P_{\text{н}} > P_{\text{норм}}$. В этом случае это решение может оказаться ошибочным с вероятностью $P(H_0 / H_1) = \beta \le 1 - Q_1$.

В противном случае, когда $P_{\text{в}} < P_{\text{норм}}$, средство измерений не признается пригодным к применению.

Такая трансформация исходной гипотезы о случайной погрешности к проверке гипотезы о вероятности может оказаться неработоспособной. Это может произойти потому, что при значении вероятности $P_{\text{норм}}$, близком к единице, и значительном количестве значений погрешности, которые будут попадать в нормированный промежуток $(-\Delta_{\text{норм}}, +\Delta_{\text{норм}})$, верхняя граница вероятности $P_{\text{в}}$ будет равна единице или очень близка к единице. По этой причине контролировать риск α удастся не всегда.

В данном случае наиболее приемлемым методом поверки средств измерений в отношении случайных погрешностей может быть метод, основанный на применении последовательного метода А. Вальда проверки простой гипотезы о вероятности:

H_0: $P = P_{\text{норм}}$ против H_1: $P = P_1$, $P_1 < P_{\text{норм}}$.

Обычно достаточно принять $P_1 = 0{,}8\, P_{\text{норм}}$.

В процессе испытаний после каждого из них ведется подсчет количества k случаев, когда полученное значение случайной погрешности вышло за пределы нормы, и это количество сравнивается со значениями, которые лежат на двух прямых линиях:

$$y(n) = \frac{1}{\ln\dfrac{P_{\text{норм}}}{P_1} - \ln\dfrac{1 - P_{\text{норм}}}{1 - P_1}} \left(n \ln\frac{1 - P_1}{1 - P_{\text{норм}}} + \ln\frac{1-\beta}{\alpha} \right),$$

$$y(n) = \frac{1}{\ln\dfrac{P_{\text{норм}}}{P_1} - \ln\dfrac{1 - P_{\text{норм}}}{1 - P_1}} \left(n \ln\frac{1 - P_1}{1 - P_{\text{норм}}} + \ln\frac{\beta}{1-\alpha} \right),$$

где α и β — вероятности ошибочных решений (риски производителя и потребителя) соответственно, которые обеспечиваются, если каждая из них не превышает 0,15.

Пример таких прямых приведен на рис. 4.11. Они параллельны. Часть плоскости, лежащая над верхней прямой, — зона отклонения нулевой гипотезы. Часть плоскости, лежащая под нижней прямой, — зона принятия нулевой гипотезы. Зона между ними называется *зоной безразличия*. Ее ширина определяется вероятностями α и β, а также разностью между вероятностями $P_{\text{норм}}$. Процесс последовательной проверки сформулированной гипотезы отображается на координатной плоскости (см. рис. 4.11) ступенчатой траекторией точки с координатами (n, k), где n — номер очередного испытания (эксперимента),

k — суммарное количество случаев выхода значений случайной погрешности за пределы нормы. Испытания продолжаются до тех пор, пока эта траектория не выйдет в зону принятия той или иной гипотезы.

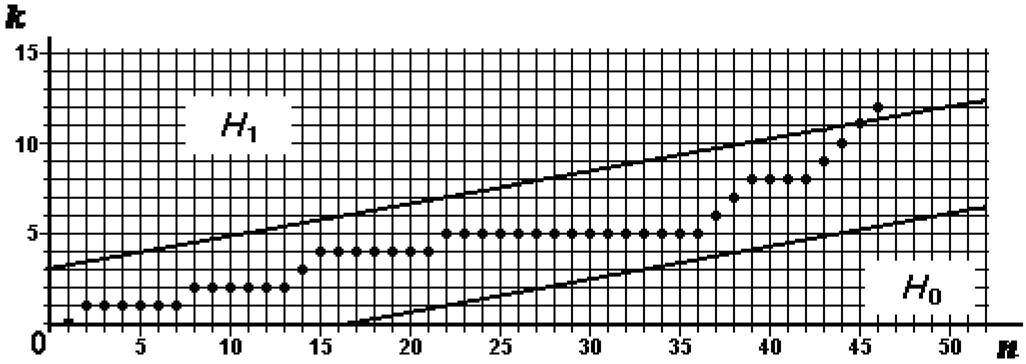

Рис. 4.11. Пример траектории процесса проверки гипотезы о вероятности методом статистического последовательного анализа

А. Вальдом доказано, что при неограниченном количестве испытаний процесс заканчивается с вероятностью 1. Однако на практике количество испытаний ограничено по экономическим, техническим и иным причинам. Поэтому при выходе на это ограничение приходится принимать то или иное решение в зависимости от того, какой риск α или β более оправдан. Преимущество статистического последовательного анализа состоит в том, что здесь гипотеза проверяется при каждом новом результате непосредственно в процессе испытаний, и за счет этого общая трудоемкость в среднем по множеству подобных процессов уменьшается.

Если погрешность нормирована без разделения на систематическую и случайную составляющие, и норма установлена в виде промежутка, границами которого являются предельно допускаемые с вероятностью $P_{\text{норм}}$ погрешности: $\left(-\Delta_{\text{норм}}, +\Delta_{\text{норм}}\right)$, то процедура поверки средства измерений и его поверки может быть выполнена в полном соответствии с описанным последовательным статистическим анализом А. Вальда. В этом случае также подсчитываются факты выхода значений общей погрешности за пределы нормы.

4.6.4. Проверка соответствия статической характеристики преобразования номинальной характеристике

Статическая характеристика преобразования или функция преобразования измерительного преобразователя — это зависимость значения величины на выходе измерительного преобразователя от значения входной величины. Если измерительный преобразователь — это датчик, то входная величина есть измеряемая величина.

Как уже отмечалось в разд. 4.4.3, ГОСТ 8.009 [3] предусматривает представление номинальной статической характеристики преобразования в виде таблицы, графика или функции $y = f(x)$, хотя представление характеристики в виде обратной функции в ряде случаев более удобно (см. также разд. 4.4.3).

Однако, учитывая существующую практику, будем рассматривать процедуру экспериментального контроля соответствия реальной статической характеристики преобразования номинальной характеристике $y = f(x)$. Метрологический эксперимент в этом случае должен выполняться методом «по мере».

При задании характеристики преобразования в виде таблицы или графика эксперимент заключается в том, что на вход измерительного преобразователя от многозначной меры или калибратора подаются значения входной (может быть измеряемой) величины $x_1, x_2, ..., x_k$, заданные в нормативном документе (чаще всего это нормативный документ на измерительный преобразователь, методика поверки или калибровки), и при этих значениях измеряют значения выходного сигнала. Если случайные погрешности отсутствуют, при каждом значении x выполняется по одному измерению при прямом и обратном ходе, как это описано в разд. 1.6. По результатам такого эксперимента положительное решение принимается, если при всех заданных значениях x отклонение всех результатов измерений выходного сигнала от табличных или графических значений не превысило значения нормы, установленной для основной абсолютной инструментальной погрешности. Точно такой же эксперимент и такие же выводы делаются при отсутствии случайных погрешностей и задании статической характеристики преобразования в виде функции с той разницей, что экспериментальные значения погрешностей в точках $x_1, x_2, ..., x_k$ вычисляются, как отклонения результатов измерений $\tilde{y}_i$ от расчетных значений выходного сигнала в этих же точках: $\Delta_i = \tilde{y}_i - f(x_i)$ (см. также разд. 1.6).

В тех случаях, когда случайная составляющая погрешности существенна, необходимо выполнять многократные измерения выходного сигнала при каждом значении x_i входного сигнала из числа заданных значений $x_1, x_2, ..., x_k$. В результате этих измерений при каждом значении x_i будет получена выборка значений погрешности, вычисляемых как разности между результатом измерений и соответствующим заданным (при табличной и графической формах) или расчетным значениями выходной величины: $\Delta_i = \tilde{y}_i - f(x_i)$. По каждой из полученных выборок по формулам (4.20) вычисляются оценки систематической и дисперсии случайной составляющих погрешности. После этого для принятия решения о метрологической годности или негодности средства измерений в соответствии с разд. 4.6.2 и 4.6.3 применяются методы проверки статистических гипотез о систематической и случайной погрешности (если они нормированы раздельно) или об общей погрешности без разделения на систематическую и случайную в соответствии с разд. 4.6.3. Результирующее положительное решение о статической характеристике средства измерений выносится тогда, когда положительные решения вынесены во всех точках $x_1, x_2, ..., x_k$.

4.7. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.7.1. Тестовые сигналы

Экспериментальное определение или контроль характеристик погрешности, нормируемых интервалом $(-\Delta_{\text{н}}, +\Delta_{\text{н}})$, соответствующим вероятности P_0 (см. разд. 3.2), которое выполняется при метрологических испытаниях средств измерений методами «по мере» или «по образцовому прибору» (см. разд. 1.6), происходит в статическом режиме. В этом режиме используются высокоточные источники постоянного образцового входного сигнала, которые обеспечивают требуемые значения этого сигнала и поддерживают его заданные значения неизменными во времени с нормированной точностью, как того требует поверочная схема (см. разд. 1.4.4). Обработка данных этих экспериментов выполняется методами математической статистики (см. разд. 4.5 – 4.6).

Совсем иной характер носит эксперимент по определению или контролю метрологических динамических характеристик средств измерений, который выполняется при их метрологических испытаниях. Понятно, что измерения при таком эксперименте должны выполняться в динамическом режиме, когда входной испытательный сигнал должен изменяться во времени определенным образом. Форма изменения этого сигнала должна воспроизводиться с нормированной точностью. Такие сигналы, предназначенные для определения динамических характеристик, называются *тестовыми сигналами*.

Напомним перечень динамических характеристик, из числа которых для нормирования следует выбрать одну (см. также разд. 3.3).

- $K(j\omega)$ — комплексная частотная характеристика (КЧХ),

$$K(j\omega) = A(\omega)e^{j\omega} = Re(\omega) + j\,Im(\omega),$$

- амплитудно-частотная (АЧХ) $A(\omega)$ и фазочастотная характеристика (ФЧХ) $\varphi(\omega)$,

- импульсная переходная характеристика (ИПХ) $k(t) = \dfrac{d}{d\,t}H(t)$,

- переходная характеристика $H(t) = \int\limits_0^t k(\tau)\,d\tau$.

Кроме перечисленных полных характеристик ГОСТ 8.009 [3] разрешает нормировать также частные динамические характеристики (см. также разд. 3.3) такие, как время реакции t_r, нижняя $\omega_н$ и верхняя $\omega_в$ частоты.

В практике нормирования КЧХ обычно выбирают экспоненциальную форму ее представления в виде произведения амплитудно-частотной характеристики $A(\omega)$ (АЧХ) на комплексную экспоненту, показателем степени которой является фазочастотная характеристика $\varphi(\omega)$ (ФЧХ).

$$K(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

Физический смысл АЧХ — это коэффициент усиления входного синусоидального сигнала частоты ω по амплитуде, а ФЧХ — представляет собой сдвиг входного синусоидального сигнала частоты ω по фазе. Для экспериментального определения и контроля этих компонент КЧХ или КЧХ в целом необходимо воспроизводить в предполагаемом частотном диапазоне синусоидальные тестовые входные сигналы известной амплитуды и различной частоты и измерять на каждой частоте фазовый сдвиг между выходным и входным сигналами.

Синусоидальные тестовые сигналы могут быть легко воспроизведены в виде сигнала тока или напряжения, и с их помощью определяются АЧХ и ФЧХ линейных измерительных преобразователей. Тем не менее, при поверке (калибровке) аналоговых преобразователей с электрическим входом и выходом может возникнуть одна трудность: при испытаниях измерительных преобразователей с очень большим или очень малым коэффициентом преобразования появляются проблемы измерения разности фаз между сигналами, сильно различающимися по амплитуде.

Кроме того синусоидальный тестовый сигнал с нормированными метрологическими характеристиками может быть воспроизведен при поверке (калибровке) датчиков некоторых физических величин. Это сигналы переменного давления, воспроизводимые с помощью специального генератора переменного давления жидкостей с частотой до 30 кГц, сигналы синусоидального ускорения, угловой скорости и виброперемещения, воспроизводимые с помощью управляемых вибростендов и двойных центрифуг, сигналы давления воздуха, в том числе, звуковые сигналы, воспроизводимые с помощью звуковоспроизводящих устройств в специальных помещениях с неотражающими стенами. В этих ситуациях возможно экспериментальное определение или контроль только АЧХ. ФЧХ определяется путем вычислений по известной АЧХ в силу того, что для минимальнофазовых преобразователей, в том числе датчиков, АЧХ и ФЧХ связаны взаимно-однозначно преобразованием Гильберта. Иной способ обойтись без измерения разности фаз между входным и выходным разнородными гармоническими сигналами состоит в дробно-рациональной аппроксимации квадрата АЧХ, который является четной вещественной функцией круговой частоты ω при выполнении условия минимальной фазовости и устойчивости реального преобразователя. После этого находятся корни полиномов числителя и знаменателя, и выполняется факторизация полученной дроби. Этот метод в дальнейшем будет описан подробнее.

Непреодолимые трудности воспроизведения синусоидального тестового входного сигнала возникают при необходимости определения или контроля динамических характеристик (КЧХ, АЧХ, ФЧХ) датчиков таких неэлектрических величин, как измерители температуры, влажности, уровня и расхода жидких и сыпучих тел, концентрации опасных газов, интенсивности радиоактивного и прочего излучения и тому подобных величин. Для некоторых из датчиков таких величин удобно применить ступенчатые входные тестовые сигналы, откликом на которые является переходная характеристика $H(t)$ — полная динамическая характеристика. Эти же тестовые сигналы применяются для определения времени реакции t_r не только линейных, но и нелинейных средств измерений (см. разд. 3.3). У нелинейных средств измерений время реакции чаще всего бывает единственной нормируемой динамической характеристикой, которая в силу нелинейности может быть различной при различных размерах ступенчатого изменения тестового сигнала.

Кроме описанных двух видов возможных тестовых сигналов существует еще один вид сигнала, удобный для воспроизведения только в виде электрического напряжения, силы электрического тока или в виде активного сопротивления. Это сигналы — псевдослучайные двоичные последовательности. Они еще называются *m-последовательностями* и, как функции времени обозначаются $m(t)$. Пример генератора таких последовательностей приведен на рис. 4-12. Этот генератор представляет собой цепочку сдвиговых регистров, охваченных обратной связью и пронумерованных в обратном порядке. Обратная связь поступает на вход цепочки регистров с выхода сумматора по модулю 2. На вход сумматора поступают сигналы с двух регистров: с последнего (на рис. 4.12 он обозначен цифрой 1) и с регистра, номер которого *m* зависит от общего количества *n* регистров в цепочке. Так, например, при n = 5 m = 2, при n = 9 m = 4, при n = 16 m = 7, при n = 22 m = 1. Подробная таблица таких включений приводится в книге [22].

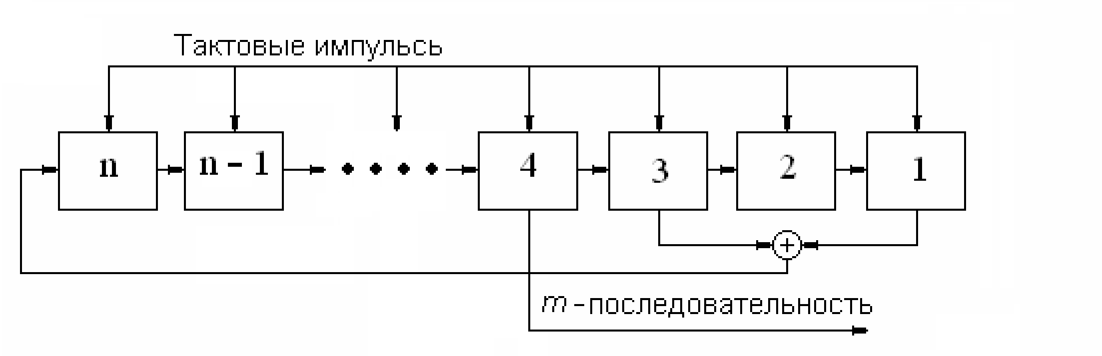

Рис. 4.12. Пример генератора *m*-последовательности

Сгенерированная таким образом *m*-последовательность является периодической с периодом $M = (2^n - 1)\Delta t$, где Δt — интервал времени между тактовыми импульсами и таким же интервалом дискретизации обладает *m*-последовательность. В силу дискретности и периодичности *m*-последовательности ее спектр периодический и дискретный, а его огибающая описывается формулой

$$\Delta t \left(\frac{sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right)^2 .$$

Период спектра *m*-последовательности равен $2\pi / \Delta t$, а его дискретность $\Delta\omega = 2\pi / M = 2\pi / (2^n - 1)\Delta t$

Вид однополярной *m* –последовательности представлен на рис. 4.13.

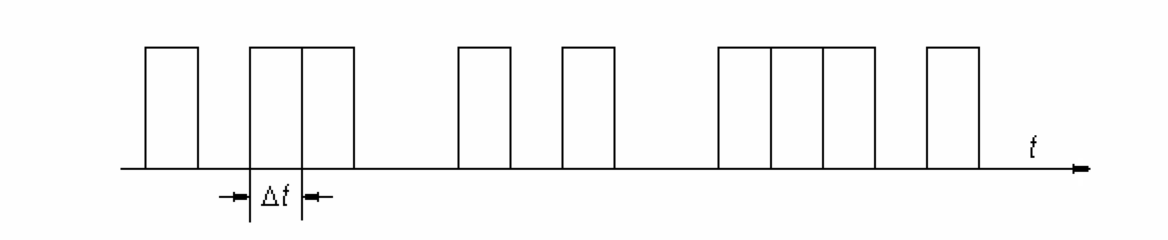

Рис. 4.13. Пример тестового сигнала в виде *m*-последовательности

Если этот сигнал будет управлять переключателем постоянной измеряемой величины, воспроизводимой мерой или калибратором, таким образом, чтобы переключалась полярность сигнала источника, то в результате будет получен двуполярный двоичный сигнал, представленный на рис. 4.14, где показана также его автокорреляционная функция.

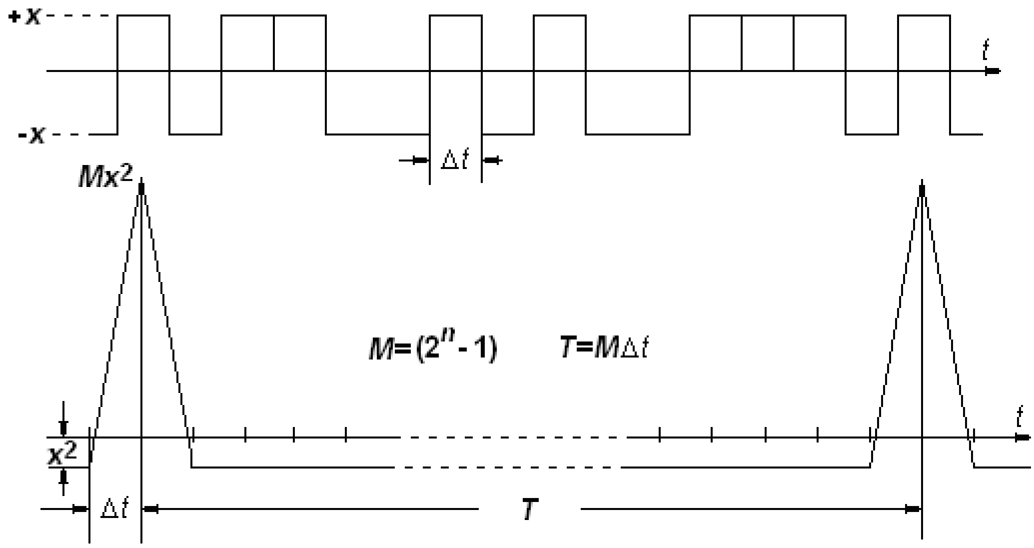

Рис. 4.14. Тестовый бинарный двуполярный сигнал и
его автокорреляционная функция

На этом рисунке x — значение сигнала измеряемой величины, воспроизводимое мерой или калибратором, Δt — период следования тактовых импульсов, n — число сдвиговых ячеек, $T = (2^n - 1)\Delta t = M\Delta t$ — период автокорреляционной функции m – последовательности, который совпадает с периодом m – последовательности:

$$T = M\,\Delta t, \quad M = \left(2^n - 1\right). \qquad (4.39)$$

Периодичность автокорреляционной функции вызвана дискретностью и периодичностью m – последовательности.

Из рис. 4.14 и формулы (4.39) видно, что с увеличением количества n ячеек в цепочке регистров сдвига, то есть с увеличением периода T и с уменьшением периода тактовых импульсов Δt автокорреляционная функция m – последовательности стремится к δ-функции, то есть

$$R_{mm}(\tau) = \int_0^T m(t)\, m(t+\tau)\, d\tau \underset{\substack{T\to\infty \\ \Delta t\to 0}}{\to} \delta(\tau). \qquad (4.40)$$

Известно, что автокорреляционная функция белого шума есть δ-функция, имеющая равномерную спектральную плотность на всей оси абсцисс. Поэтому и в связи с пределом (4.40) m – последовательность именуется псевдослучайной последовательностью.

Поскольку в реальности невозможно добиться того, чтобы $\Delta t = 0$ и $T = \infty$, поэтому постоянная составляющая m – последовательности не будет равна нулю, а отрицательная часть автокорреляционной функции будет вносить погрешность в результат вычислений, о которых речь пойдет ниже. Эту отрицательную часть автокорреляционной функции можно убрать посредством регулировки соотношения между амплитудами положительных и отрицательных импульсов в двуполярной m – последовательности.

Почему m – последовательность является удобным тестовым сигналом для определения ИПХ?

Во-первых, амплитуда m – последовательности может быть воспроизведена с очень высокой точностью с помощью имеющихся мер и калибраторов, если в этом участвует высококачественный переключатель, который управляется от исходной m – последовательности, сгенерированной цепочкой сдвиговых регистров.

Во-вторых, при стационарном случайном сигнале с автокорреляционной функцией $R_{xx}(\tau)$, действующем на входе линейного устройства с ИПХ $k(t)$, взаимная автокорреляционная функция этого входного сигнала с сигналом на выходе в соответствии с уравнением Винера-Хопфа выражается, как свертка автокорреляционной функции входного сигнала и ИПХ:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^\infty k(t) R_{xx}(\tau - t) dt. \tag{4.41}$$

Если $R_{xx}(\tau)$ = δ(τ), то $R_{xy}(\tau)$ = k(τ). По этой причине, а также в связи с тем, что при увеличении n автокорреляционная функция $R_{mm}(\tau)$ в соответствии с (4.40) стремится к δ-функции, можно считать, что при входном сигнале $m(t)$ в виде m-последовательности определение дискретных значений ИПХ выполняется путем измерения соответствующих значений взаимнокорреляционной функции $R_{my}(\tau)$ входной m-последовательности и выходного сигнала у(t) с помощью коррелометра:

$$k(\tau) = R_{my}(\tau) = \int_0^T m(t + \tau) y(t) dt \tag{4.42}$$

Для уверенного определения ИПХ необходимо, чтобы частотная полоса m-последовательности была гораздо шире предполагаемой полосы пропускания испытуемого средства измерений. Если ω_B — верхняя частота полосы пропускания испытуемого средства измерения, то интервал дискретности m-последовательности должен удовлетворять неравенству

$$\Delta t \le \frac{0.6\pi}{\omega_B}.$$

Для устранения влияния периодичности автокорреляционной функции m-последовательности необходимо обеспечить ее период $T = (2^n - 1)\Delta t$ таким, чтобы он в два-три раза превышал интервал практически полного затухания предполагаемой ИПХ испытуемого средства измерений, то есть, чтобы $k(T/2) \approx 0$.

При этом, конечно, возникает незначительная неприятность, вызванная отрицательной частью автокорреляционной функции m – последовательности, которая может быть устранена незначительной регулировкой или внесением поправки в конечный результат. Если эта регулировка не выполняется, то абсолютная погрешность определения ИПХ, вызванная отрицательной частью $-x^2$ автокорреляционной функции, равна $\Delta k(t) \approx -x^2 \int\limits_0^{M\Delta t} k(t)\,dt \approx -x^2 K(0)$, где $K(0)$ — коэффициент преобразования (усиления) сигнала, неизменного во времени.

4.7.2. *Экспериментальное определение частотных характеристик*

Из трех частотных характеристик проще всего определяется АЧХ. В этом метрологическом эксперименте тестовый сигнал $x_\text{Т}(t)$ должен быть синусоидальным $x_\text{Т}(t) = A_\text{Т}\sin\omega\text{t}$, параметры которого: амплитуда $A_\text{Т}$, частота ω и отклонение формы от синусоидальной, то есть коэффициент нелинейных искажений $k_\text{н.и.}$ должны быть точно известны, и поэтому характеристики погрешности их воспроизведения должны быть нормированы. Поскольку линейное средство измерений в математической трактовке представляет собой линейный оператор **A**, поэтому оно обладает собственными функциями $u(t)$, которые не меняют свою форму при действии на них оператора: $\mathbf{A}u(t) = Ku(t)$, где K — произвольный множитель. Хорошо известно, что для линейных физически реализуемых устройств такими собственными функциями являются синусоидальные функции (см. также разд. 3.3). Тогда при постоянной амплитуде $A_\text{Т} = 1$ синусоидального тестового сигнала на частотах $\omega = \omega_i$ множители K есть не что иное, как значения АЧХ при этих частотах: $\mathbf{A}\sin\omega_\text{i} t = A(\omega_i)\sin(\omega_\text{i} t + \varphi(\omega_i))$, где $\varphi(\omega_i)$ — значения ФЧХ при тех же частотах. Из изложенного понятно, что поскольку синусоиды не являются собственными функциями нелинейных операторов, частотные характеристики таких операторов не могут быть определены и нормированы.

Метрологический эксперимент по определению или контролю значений АЧХ выполняется следующим образом.

Тестовый синусоидальный сигнал подается на вход поверяемого средства измерений от источника (генератора, калибратора), с известными и нормированными характеристиками погрешности $\Delta A, \Delta\omega$ и $k_{\text{н.и.}}$. На каждой заданной частоте ω_i из установленного перечня $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_k$ измеряется амплитуда $A_{\text{вых}}(\omega_i)$ синусоидального выходного сигнала, после чего значение АЧХ на этой частоте вычисляется как отношение

$$A(\omega_i) = A_{\text{вых}}(\omega_i) / A_{\text{Т}}.$$

Если измерения при каждой частоте ω_i выполняются многократно, то выполняется усреднение значений $A(\omega_i)$.

ГОСТ 8.009 [3] предписывает нормирование и представление АЧХ в одном из следующих видов: таблицей, графиком или функцией.

При первых двух вариантах представления и нормирования АЧХ эксперимент на этом заканчивается. В третьем варианте должна быть выполнена аппроксимация АЧХ по полученным экспериментальным данным. Если КЧХ средства измерений представлена дробью, то есть отношением двух комплексных полиномов, выбор функции, подходящей для аппроксимации, сильно затруднен. С другой стороны представляется естественным следующий путь. Поскольку квадрат модуля КЧХ, представленной в виде отношения комплексных полиномов (см. разд. 3.3), есть четная вещественная функция, аргументом которой является ω^2, возможна дробно-рациональная аппроксимация квадрата АЧХ с аргументом ω^2. В технической литературе [24, 25] представлена программа такой аппроксимации, в которой учитывается плохая обусловленность этой процедуры. Регуляризация решения осуществляется посредством последовательного повышения степеней полиномов числителя m и знаменателя n с контролем физической реализуемости результата (то есть обеспечением условия $m \leq n$). Остановка процедуры выполняется путем сопоставления погрешности аппроксимации с погрешностью измерения и вычисления квадратов дискретных значений АЧХ. Это сопоставление происходит посредством проверки соответствующей статистической гипотезы по критерию «хи-квадрат».

Другая более доступная программа дробно-рациональной аппроксимации имеется в программной оболочке «MatLab».

В результате дробно-рациональной аппроксимации квадрата АЧХ будет получена дробь

$$A^2(\omega) = |K(j\omega)|^2 = \frac{d_m \omega^{2m} + d_{m-1}\omega^{2(m-1)} + \ldots + d_1\omega^2 + 1}{c_n \omega^{2n} + c_{n-1}\omega^{2(n-1)} + \ldots + c_1\omega^2 + 1}, \tag{4.43}$$

где $d_1, d_2, \ldots, d_n$ и $c_1, c_2, \ldots, c_n$ — оценки коэффициентов.

Тогда функциональное представление АЧХ будет иметь вид:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{d_m \omega^{2m} + d_{m-1}\omega^{2(m-1)} + \ldots + d_1\omega^2 + 1}{c_n \omega^{2n} + c_{n-1}\omega^{2(n-1)} + \ldots + c_1\omega^2 + 1}}.$$

Наиболее полной частотной характеристикой аналоговых линейных средств измерений, предлагаемой для нормирования стандартами ГОСТ 8.009 [3] и ГОСТ 8.256 [6], является КЧХ, которая содержит в себе информацию о зависящих от частоты амплитудном преобразовании и о фазовом сдвиге входного сигнала. Желательно представлять и нормировать КЧХ в виде функции, а это значит, что экспериментальное определение КЧХ также должно обеспечивать ее функциональное выражение. Эту цель можно достичь с использованием приема дробно-рациональной аппроксимации квадрата АЧХ (4.43).

Дробно-рациональная аппроксимация квадрата АЧХ оказывается единственным путем экспериментального определения КЧХ в виде функции в условиях, когда невозможно измерить фазовый сдвиг $\varphi(\omega)$ выходного синусоидального сигнала относительного входного. Чаще всего такая ситуация возникает при метрологических испытаниях датчиков неэлектрических величин. Помимо этого значительная погрешность экспериментального определения фазового сдвига между выходным и входным синусоидальными сигналами имеет место при испытаниях преобразователей (усилителей) напряжения или тока с большим коэффициентом усиления.

Если во всех этих случаях воспроизведение синусоидального тестового сигнала с нормированными характеристиками погрешности параметров оказывается возможным, тогда экспериментально определяется АЧХ, затем осуществляется дробно-рациональная аппроксимация квадрата АЧХ, после чего полученная дробь (4.43) факторизуется. Целью факторизации дроби, числитель и знаменатель которой суть функции от ω^2, является представление числителя и знаменателя в виде произведения комплексно сопряженных полиномов. Этот процесс выполняется посредством нахождения и последующей сортировки корней исходных полиномов числителя и знаменателя дроби (4.43). Вещественные корни полиномов дроби (4.43) образуют пары корней, различающихся знаками. Комплексные корни образуют четверки корней вида $\pm\alpha \pm j\beta$. Из этих корней отбираются: для числителя — корни $\pm\alpha + j\beta$ с неотрицательной, в том числе, нулевой мнимой частью ($\beta \geq 0$, обеспечивается минимальнофазовость), для знаменателя – корни $\pm\gamma + j\delta$ с положительной мнимой частью ($\gamma > 0$, обеспечивается устойчивость). Тогда КЧХ представляется в виде (см. также [24, 25])

$$K(j\omega) = \frac{(\omega-\alpha_1-j\beta_1)(\omega+\alpha_1-j\beta_1)(\omega-\alpha_2-j\beta_2)(\omega+\alpha_2-j\beta_2)\ldots(\omega-\alpha_m-j\beta_m)(\omega+\alpha_m-j\beta_m)}{(\omega-\gamma_1-j\delta_1)(\omega+\gamma_1-j\delta_1)(\omega-\gamma_2-j\delta_2)(\omega+\gamma_2-j\delta_2)\ldots(\omega-\gamma_n-j\delta_n)(\omega+\gamma_n-j\delta_n)}.$$

Эта дробь, как и всякая комплексная функция, может быть представлена в виде суммы вещественной и мнимой частей:

$$K(j\omega) = Re(\omega) + j\,Im(\omega),$$

по значениям которых при заданных значениях частоты вычисляется ФЧХ:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\frac{Im(\varphi)}{Re(\varphi)}.$$

4.7.3. Экспериментальное определение динамических характеристик, зависящих от времени

Стандарты ГОСТ 8.009 [3] и ГОСТ 8.256 [6] рекомендуют нормировать одну из следующих полных динамических метрологических характеристик, зависящих от времени: переходную характеристику $H(t)$ и импульсную переходную характеристику ИПХ (весовую функцию) $k(t)$.

Начнем с определения переходной характеристики.

Единственным входным тестовым сигналом, позволяющим получить набор мгновенных значений переходной характеристики линейных средств измерений с помощью прямых непосредственных измерений, является скачкообразный сигнал от нулевого или от максимального уровня в диапазоне изменения сигнала на входе испытуемого средства измерений. Величина скачка должна быть выбрана в пределах (0,6 – 0,8) от максимального значения входной величины в диапазоне измерения.

Эксперимент по определению переходной характеристики выполняется с применением АЦП, снабженного устройством выборки-хранения (УВХ). Измерения мгновенных значений выходного сигнала, то есть мгновенных значений переходной характеристики выполняется с помощью АЦП с постоянным интервалом дискретизации.

Момент подачи на вход испытуемого средства измерений тестового скачкообразного сигнала синхронизируется с моментами запуска АЦП так, чтобы один из моментов измерения совпал с моментом подачи скачка входного сигнала. Интервал дискретизации измерений Δt выбирается таким образом, чтобы обеспечить уверенный метрологический анализ в частотном диапазоне, интересующем потребителя. Если этот частотный диапазон есть $(0, \omega_в)$, то

$$\Delta t \in \left(\frac{2\pi}{5\omega_в}, \frac{2\pi}{3\omega_в} \right).$$

При нормировании и представлении переходной характеристики в виде графика или таблицы на этом эксперимент заканчивается. При необходимости получить функциональную форму переходной характеристики, то разумнее всего выполнить по полученным мгновенным значениям ее аппроксимацию функцией, содержащей экспоненты с отрицательными вещественными показателями степени вида Ae^{-at} и с мнимыми показателями степени вида $Be^{jb\omega}$, то есть с тригонометрическими функциями $\cos b\omega$ и $\sin b\omega$. Такая аппроксимация сводится к оценке коэффициентов, входящих в аппроксимирующую функцию нелинейно, и для такой аппроксимации необходимо применять поисковые методы.

Определение импульсной переходной характеристики (ИПХ) возможно следующими тремя способами.

Первый способ — конечноразностным дифференцированием переходной характеристики, полученной ранее, или аналитическим дифференцированием, если известна функция, аппроксимирующая мгновенные значения этой переходной характеристики.

Второй способ — обратное преобразование Фурье КЧХ с помощью дискретного БПФ или, если известен функциональный вид КЧХ, то аналитическим преобразованием Фурье.

Третий способ — непосредственное определение мгновенных значений ИПХ при тестовом входном сигнале в виде m-последовательности посредством измерения или вычисления дискретных значений взаимнокорреляционной функции между входным и выходным сигналом, как это следует из формулы (4.42).

В результате конечноразностного дифференцирования дискретных мгновенных экспериментальных значений переходной характеристики определяются также дискретные значения импульсной переходной характеристики. В силу плохой обусловленности процедуры конечноразностного дифференцирования погрешности результатов определения значений характеристики $k(t)$ в сильной степени определяются значением интервала дискретизации и погрешностями исходных данных и могут достигать недопустимо больших значений. Некоторого уменьшения этих погрешностей можно добиться за счет варьирования интервала дискретизации Δt, например, путем разрежения отсчетов.

Реализация второго способа путем обратного преобразования Фурье дает набор дискретных значений ИПХ. В случае нормирования ИПХ в виде графика или таблицы на этом ее определение заканчивается.

Дискретные значения ИПХ будут получены и при эксперименте, выполняемом при входном тестовом сигнале в виде m-последовательности. Поскольку с увеличением количества регистров сдвига n, а значит, и периода $T = (2^n - 1)\Delta t$ генератора m-последовательности ее автокорреляционная функция стремится к δ-функции, эксперимент по определению импульсной переходной характеристики выполняется следующим образом. На вход средства измерений подается тестовый сигнал $m(t)$ в виде m-последовательности, и в соответствии с выражениями (4.40), (4.41) мгновенные значения искомой ИПХ получаются, как значения взаимнокорреляционной функции тестового сигнала на входе и сигнала на выходе испытуемого средства измерений, то есть $k(\tau_i) = R_{my}(\tau_i)$. Эти значения могут быть вычислены по результатам измерений входного и выходного сигналов или получены в результате измерения взаимнокорреляционной функции с помощью коррелометра. Период тестовой

m-последовательности должен быть таким, чтобы при $2\tau \geq T$ $k(\tau) \approx 0$, а интервал дискретности $\Delta t \leq 0.6\pi / \omega_B$. Желательно также, чтобы длительность измерений занимала несколько периодов входной m-последовательности. Отрицательная постоянная составляющая автокорреляционной функции m-последовательности, показанная на рис. 4.14 и равная $-x^2$, внесет в результаты измерений абсолютную систематическую погрешность $-x^2 \int_0^T k(\tau) d\tau$. Поскольку характеристика $k(\tau)$ почти целиком существует на интервале $(0, T/2)$, интеграл от нее по этому интервалу с большой степенью точности является коэффициентом преобразования (усиления) постоянного сигнала, то есть значению КЧХ при $\omega = 0$: $K(0) \cong \int_0^T k(\tau) d\tau$. Тогда систематическая погрешность определения $k(t_i)$, вызванная отрицательной частью $-x^2$ автокорреляционной функции $R_{mm}(\tau)$ (см. рис. 4.14), в абсолютном выражении равна $-x^2 K(0)$.

Поскольку эта погрешность систематическая, ее можно устранить путем ввода поправки. Кроме того автокорреляционная функция m-последовательности на отрезке $(-\Delta t, +\Delta t)$ имеет треугольную форму. Это отличие автокорреляционной функции от δ-функции также приводит к погрешности, которая определяется через вторую производную от истинной ИПХ (см., например, [26]):

$$\Delta k(t) = k''(t) \Delta t^2 / 12.$$

Если выходной сигнал содержит в себе случайную погрешность в виде шума с дисперсией σ_n^2, то дисперсия случайной погрешности результатов измерений будет равна

$$\sigma^2 = x^2 \sigma_n^2 / j \Delta t,$$

где j — количество периодов m-последовательности, в течение которых выполнялись измерения.

В случае нормирования импульсной переходной характеристики в виде графика или таблицы на этом ее определение заканчивается.

При необходимости получить функциональную форму импульсной переходной характеристики $k(t)$, то, как и ранее, выполняется аппроксимация полученных мгновенных значений функцией, содержащей экспоненты с отрицательными вещественными показателями степени вида Ae^{-at} и с мнимыми показателями степени вида $Be^{jb\omega}$, то есть с тригонометрическими функциями $\cos b\omega$ и $\sin b\omega$. Обычно такая аппроксимация сводится к оценке коэффициентов, входящих в аппроксимирующую функцию нелинейно, и для ее выполнения необходимо применять поисковые методы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс.– СПб.: НПО «Профессионал», 2008. – 280 с.

2. Кнорринг В. Г., Марамзина М. Г. Метрология, стандартизация, сертификация: учеб. пособие / В. Г. Кнорринг, М. Г. Марамзина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 239 с.

3. ГОСТ 8.009 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».– М.: Изд. стандартов, 1985.–38 с.

4. ГОСТ 8.061 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение».– М.: Изд. стандартов, 1980. – 10 с.

5. ГОСТ 8.315 «ГСИ. Стандартные образцы. Основные положения».– М.: Изд. стандартов, 2004.– 20 с.

6. ГОСТ 8.256 «ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения».– М.: Изд. стандартов, 1977.– 9 с.

7. ГОСТ 8.513 «ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения».– М.: Изд. стандартов, 1985.– 8 С.

8. ГОСТ 8.596 «ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения».– М.: Изд. стандартов, 2002.– 11 С.

9. ГОСТ 8.395 «ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования».– М.: Изд. стандартов, 2001.– 5 С.

10. ГОСТ Р 8.654 «ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения».– М.: Стандартинформ, 2009 .– 19 С.

11. Р 50.2.077 Рекомендации по метрологии «ГСИ. Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения».– М.: Стандартинформ, 2011.– 11 с.

12. МИ 3286 Рекомендации по метрологии «ГСИ. Проверка защиты программного обеспечения и определение уровня при испытаниях средств измерений в целях утверждения типа».– М.: Стандартинформ, 2010.– 30 с.

13. МИ 2955 Рекомендации по метрологии. «ГСИ. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений».– М.: Стандартинформ, 2010.– 22 с.

14. МИ 2174 «ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения».– М.: Изд. стандартов, 1991.– 27 с.

15. ГОСТ Р 1.3 «Государственная система стандартизации. Порядок согласования, утверждения и регистрации технических условий».– М.: Изд. стандартов, 1993.– 9 с.

16. ГОСТ 8.563 «ГСИ. Методики измерений».– М.: Стандартинформ, 2010.– 20 с.

17. МИ 2377 «ГСИ. Разработка и аттестация методик выполнения измерений».– М.: Изд. стандартов, 1998.– 21 с.

18. МИ 1967 «ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения».– М.: Изд. стандартов, 1989.– 20 с.

19. РМГ 74-2004 «ГСИ. Методы определения межповерочных интервалов средств измерений».– М.: Стандартинформ, 2005.– 21 С.

20. ГОСТ Р 54500.1-2011 «Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководство по неопределенности измерения».– М.: Стандартинформ, 2012.– 18 С.

21. ГОСТ 8.401 «ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования».– М.: Изд. стандартов, 1980.– 12 с.

22. ГОСТ 26.203 «ЕССП. Комплексы измерительно-вычислительные. Признаки классификации. Общие требования».– М.: Изд. стандартов, 1988. .– 11 С.

23. П. Мармарелис, В. Мармарелис. Анализ физиологических систем.– М.: Мир, 1981.– 480 с.

24. Солопченко Г. Н. Минимальная дробно-рациональная аппроксимация комплексной частотной характеристики средств измерений // Измерительная техника, 1982, № 4, С. 12 – 15.

25. Крейнович В. Я., Солопченко Г. Н. Оценка канонических параметров комплексных частотных характеристик средств измерений // Измерительная техника, 1993, № 9, С. 11 – 14.

26. Доценко В. И. Анализ погрешностей при идентификации линейных объектов с использованием псевдослучайных двоичных сигналов // Труды МЭИ, 1969, вып. 68, С. 83 – 92.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ПРИМЕРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ОБЕКТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Объект измерения — электрическая цепь. Измерению подлежит параметр этой цепи, а именно, постоянное напряжение на ее участке, сопротивление которого равно $R_{\text{Н}}$ (см. рис. П1.1, *а*). Эквивалентное сопротивление остальной части цепи равно $R_{\text{Ц}}$. Истинное значение измеряемого напряжения, которое было на сопротивлении $R_{\text{Н}}$ до подключения вольтметра, равно U_x. Средство измерений — стрелочный вольтметр, собственное сопротивление которого указано в его технической документации. Для расчета эффекта, производимого взаимодействием, будем считать, что инструментальная погрешность вольтметра равна нулю.

$$U_x = E\frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{Ц}}}, \qquad \tilde{U} = E\frac{R_{\text{Н}}R_{\text{В}}}{R_{\text{Н}}R_{\text{В}} + R_{\text{Н}}R_{\text{Ц}} + R_{\text{Ц}}R_{\text{В}}},$$

$$\Delta U = \tilde{U} - U_x = -E\frac{R_{\text{Н}}^2 R_{\text{Ц}}}{\left(R_{\text{Н}}R_{\text{В}} + R_{\text{Н}}R_{\text{Ц}} + R_{\text{Ц}}R_{\text{В}}\right)\left(R_{\text{Н}} + R_{\text{Ц}}\right)}.$$

В этих формулах $\tilde{U}$ — напряжение, которое образуется после подключения вольтметра и оказывается меньше исходного истинного напряжения в силу шунтирования этого участка цепи сопротивлением вольтметра, общий ток в цепи увеличивается на значение тока, потребляемого вольтметром, и тем самым объект измерений изменяется. В результате этого влияния возникает систематическая погрешность, обозначенная здесь через ΔU. По отношению к результату измерения вычисляется относительная погрешность по формуле

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{\tilde{U}} = -\frac{R_{\text{Н}}R_{\text{Ц}}}{\left(R_{\text{Н}} + R_{\text{Ц}}\right)}\frac{1}{R_{\text{В}}}.$$

Умножив числитель и знаменатель полученного выражения на $\left(\tilde{U}^2\right)$, увидим, что относительная погрешность, вызванная взаимодействием вольтметра и цепи, равна отношению энергий, то есть частному от деления энергии, потребляемой вольтметром, на энергию, рассеиваемую объектом:

$$\gamma_U = -\frac{R_{\text{Н}} R_{\text{Ц}}}{\left(R_{\text{Н}} + R_{\text{Ц}}\right)\cdot\left(\tilde{U}\right)^2}\frac{\left(\tilde{U}\right)^2}{R_{\text{В}}} = -\frac{\left(\tilde{U}\right)^2}{R_{\text{В}}} : \frac{\left(\tilde{U}\right)^2}{R_{\text{ЦВ}}},$$

где $R_{\text{ЦВ}}$ — сопротивление, «видимое» со стороны вольтметра и равное сопротивлению, образованному параллельным соединением сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ и сопротивления цепи $R_{\text{Ц}}$.

В данном случае эта погрешность может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Остаточная погрешность будет определяться точностью, с которой известны значения величин, входящих в выражение для ΔU.

В соответствии с определением, приведенным в разд. 1.2, сопротивление вольтметра $R_{\text{В}}$ есть одна из его метрологических характеристик, поскольку оказывает влияние на погрешность результата измерений.

Объект измерения – хорошо перемешиваемая жидкость в сосуде (рис. П1.1, *б*).

Измерению подлежит параметр объекта: температура жидкости. Масса жидкости m_1, удельная теплоемкость c_1, истинная температура t_x^0. Средство измерений — ртутный термометр, который будем считать абсолютно точным. Его масса m_0, удельная теплоемкость погружаемой части c_0. Собственная температура термометра до его погружения в жидкость равна t_0^0, ее значение может быть считано со шкалы. Считаем, что теплообмена с внешней средой нет. В таком случае общее количество теплоты сохраняется неизменным, и уравнение теплового баланса имеет вид:

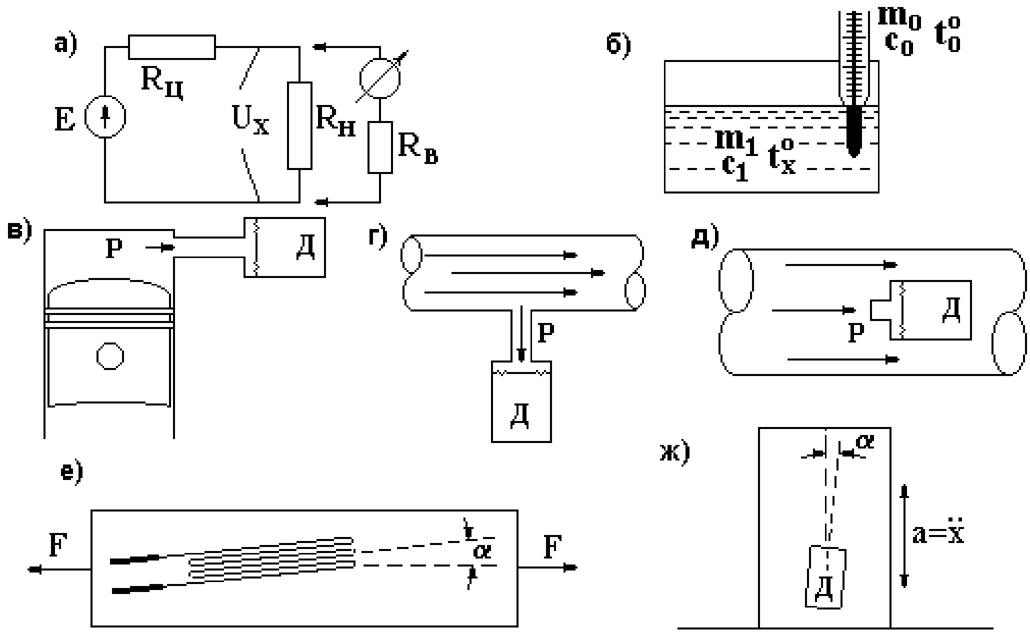

Рис. П1.1. Примеры взаимодействия средств измерений с объектом измерений

$$t_0^0 m_0 c_0 + t_x^0 m_1 c_1 = \tilde{t}^{\,0}(m_0 c_0 + m_1 c_1),$$

где $\tilde{t}^{\,0}$ — установившаяся температура жидкости, а, следовательно, погружаемой части термометра и результат измерения.

Понятно, что если температура термометра была ниже истинной температуры жидкости, температура жидкости снизится и наоборот, поднимется в противном случае. В результате такого взаимодействия термометра с объектом (жидкостью) возникает систематическая погрешность

$$\Delta t^0 = \tilde{t}^{\,0} - t_x^0 = -\frac{m_0 c_0}{m_0 c_0 + m_1 c_1}\left(t_x^0 - t_0^0\right).$$

По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_t = \frac{\Delta t^0}{\tilde{t}^{\,0}} = -\frac{m_0 c_0\left(t_x^0 - t_0^0\right)}{t_0^0 m_0 c_0 + t_x^0 m_1 c_1} = -\frac{Q_{ТЕРМ}}{Q_\Sigma},$$

то есть относительная погрешность измерения температуры, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом, равна частному от деления количества теплоты (то есть энергии), необходимой для нагревания (или охлаждения) термометра до измеряемой температуры, на количество общей теплоты, содержащейся в объекте и термометре.

В данном случае эта погрешность систематическая и может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Неисключенный остаток погрешности будет определяться точностью, с которой известны величины, входящие в формулу для Δt^{o}.

В соответствии с определением, приведенным в разд. 1.2, масса и теплоемкость погружаемой части ртутного термометра являются его метрологическими характеристиками, поскольку оказывают влияние на погрешность результата измерений.

Объект измерения – цилиндр двигателя внутреннего сгорания (рис. П1.1, *в*). Параметр, подлежащий измерению, — давление газов внутри цилиндра. Присоединение датчика Д с помощью трубки приводит к увеличению объема камеры сгорания и тем самым — к изменению объекта. Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической.

Объект измерения — трубопровод с потоком жидкости или газа (рис. П1.1, *г, д*). Параметр, подлежащий измерению — давление транспортируемого вещества. В одном случае (рис. П1.1, *г*) погрешность, вызванная нежелательным взаимодействием, будет отрицательной, в другом (рис. П1.1, *д*) — положительной.

Объект измерения — механическая конструкция. Параметр, подлежащий измерению — деформация участка конструкции. Средство измерений (датчик) — проволочный тензорезистор. Принцип действия — изменение сопротивления проволоки, из которой изготовлен датчик, при его деформации в пределах упругости. Для передачи деформации от объекта к датчику он приклеивается к объекту специальным неэластичным клеем (рис. П1.1, *е*). Погрешность от взаимодействия будет вызвана следующими обстоятельствами:

- неудовлетворительным качеством приклеивания датчика,
- увеличением жесткости объекта за счет приклеивания к нему датчика,
- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемой деформации.

Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической, отрицательной.

Объект измерения — транспортное средство, механическая конструкция, строительное сооружение. Параметр, подлежащий измерению — ускорение вибраций в заданной точке. Средство измерений — датчик ускорения, жестко устанавливаемый на объекте (рис. П1.1, *ж*). Погрешность будет вызвана следующими обстоятельствами:

- недостаточная жесткость крепления датчика к объекту, вследствие чего ускорение виброперемещений объекта передается к датчику не полностью,
- увеличением массы объекта на величину массы датчика, вследствие чего изменяется частота собственных колебаний объекта и амплитуда виброускорений,
- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемых ускорений.

Для ограничения разброса жесткости крепления датчика ускорений к объекту в технической документации на подобные датчики должно сообщаться значение усилия завинчивания крепящих винтов (при винтовом креплении). Обеспечение заданного усилия крепления датчика осуществляется за счет применения динамометра либо ключей, снабженных устройством дозирования усилия.

Для оценки степени влияния массы датчика на объект измерений в технической документации должно быть приведено значение массы датчика с указанием пределов допускаемых отклонений от номинального значения, как одной из метрологических характеристик, обусловливающих степень взаимодействия с объектом и соответствующую погрешность.

Приложение 2

ПРИМЕРНОЕ СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ ПОВЕРКИ (КАЛИБРОВКИ) СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Наименование средства измерений

Настоящий (*наименование данного документа*) распространяется на (*наименование средства измерений и ссылка на технические условия или стандарт*) и устанавливает методику их первичной и периодической поверок (калибровок). Далее для терминов поверка и калибровка применяется один термин «поверка».

1. Вводная часть

Во вводной части уточняют объект поверки, при необходимости дается краткое описание объекта поверки с тем, чтобы обосновать специфические методы поверки (калибровки), приведенные в настоящем документе. Указывается степень соответствия объекта поверки (калибровки) Российским и международным документам. Указывается вид поверки и длительность межповерочного интервала.

2. Операции поверки

При поверке выполняются операции, указанные в табл. П2.1.

Таблица П2.1

№ п/п	Наименование операции поверки	Номер пункта методики поверки	Обязательность проведения операции при		
			Выпуске из производства	Эксплуатации и хранении	Выпуске из ремонта
1	2	3	4	5	6
1.	Внешний осмотр				
2.	Опробование				
3.	Определение (контроль) МХ				
4.	Оформление результатов				

Примечания:

1. В графах 4 - 6 обязательность проведения операций указывают словом «Да» или «Нет».

2. Если в графах 4 и 5 указывают одни и те же операции, эти графы объединяют в одну с наименованием «при первичной поверке».

3. Если при проведении первичной и периодической поверок проводят одни и те же операции, графы 4 - 5 исключают.

3. Средства поверки

При проведении поверки должны быть применены средства, указанные в табл. П2.2.

Таблица П2.2

№ п/п	Наименование образцового средства измерений или вспомогательного средства поверки	Номер документа (ТУ), метрологические и технические характеристики
1	2	3

Примечание. В настоящем примечании может быть дано указание о возможности применения средств поверки, не приведенных в перечне, но обеспечивающих определение (контроль) метрологических характеристик поверяемых средств измерений с требуемой точностью. Указывается, что все образцовые средства измерений должны иметь документы о предыдущей поверке, срок которых не истек.

4. Условия поверки

Раздел должен содержать перечень физических величин (влияющих величин), не являющихся измеряемыми, но влияющих на метрологические характеристики поверяемых средств измерений. Должны быть указаны значения этих величин и диапазоны их изменения, соответствующие нормальным условиям, установленным для поверяемого и образцовых средств измерений.

Раздел должен начинаться следующим образом:

«При проведении поверки должны быть соблюдены следующие условия ....».

Указывается, что все средства измерений и вспомогательные средства перед проведением поверки должны быть прогреты в течение времени, указанного в эксплуатационных документах на эти средства.

5. Требования к квалификации поверителей

Формулируются в тех случаях, когда сложность операций поверки и математической обработки результатов поверки требует специальной квалификации.

В этих случаях раздел начинается со слов «К проведению измерений при поверке и (или) обработке результатов измерений допускаются лица (указывается уровень квалификации).

Раздел может быть дополнен перечнем документов, с которыми необходимо ознакомиться поверителю.

6. Требования безопасности

Излагаются требования, обеспечивающие при поверке безопасность труда, производственную санитарию, охрану окружающей среды. Допускаются ссылки на нормативные документы по вопросам техники безопасности. Указывается влияние (отсутствие влияния) операций поверки на экологическую безопасность.

7. Подготовка к поверке

При небольшом объеме требований к подготовке и к условиям поверки допускается объединять разделы «Условия поверки» и «Подготовка к поверке» под общим названием «Условия поверки и подготовка к ней».

Раздел должен начинаться следующей фразой:

«Перед проведением поверки должны быть выполнены следующие подготовительные работы: ....».

8. Проведение поверки

Проведение поверки заключается в последовательном исполнении следующих операций:

- внешний осмотр,
- опробование,
- определение (контроль) метрологических характеристик.

При внешнем осмотре проверяется комплектность, в том числе наличие технической документации на поверяемое средство измерений и отсутствие механических повреждений, влияющих на работоспособность и на метрологические характеристики.

При опробовании проверяется работоспособность поверяемого средства измерений. При этом образцовые средства измерений могут не использоваться.

Подраздел «Определение (контроль) метрологических характеристик» должен содержать описание каждой из операций, указанных в разделе «Операции поверки». Это описание должно быть разбито на пункты, в каждом из которых приводится отдельно каждая операция. Текст описания операций должен содержать наименование и описание метода поверки, схемы соединений, чертежи, формулы, графики, таблицы, рекомендации об округлениях результатов. В конце каждого пункта делается вывод о положительных или отрицательных результатах.

9. Обработка результатов измерений

Раздел включается при наличии сложных методов обработки.

Каждое требование раздела должно быть выделено в отдельный пункт со ссылкой на соответствующий пункт подраздела 8.

10. Оформление результатов поверки (калибровки)

Положительные результаты поверки оформляются свидетельством о поверке и (или) клеймлением поверяемых средств измерений и записью о сроке последующей поверки. Заключительная фраза: средство измерений (наименование и заводской номер) пригодно к применению на всей территории РФ.

При отрицательном результате в последнем пункте раздела заносится указание о запрещении применения средства измерений или о проведении повторной поверки после его ремонта и регулировки.

В протоколе поверки, если таковой предусмотрен, указывается дата поверки, место ее проведения, перечень средств, использованных для поверки.

При калибровке средства измерений в сопроводительном документе указываются значения метрологических характеристик, полученных в ходе калибровки, и результаты их сопоставления с установленными нормами.