

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

Г. Н. СОЛОПЧЕНКО

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ

**Конспект лекций
для III курса студентов ФТК
кафедра ИИТ**

**Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2010**

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
1.1. Метрология и метрологическое обеспечение.....	3
1.2. Стандартизация. Определение, цели и организационные основы	7
1.3. Сертификация. Определение, цели и организационные основы	9
1.4. Взаимосвязи между метрологией, стандартизацией и сертификацией	10
2. Организационные и правовые основы обеспечения единства измерений	11
2.1. Государственное управление обеспечением единства измерений	11
2.2. Государственные научные метрологические центры России.	17
2.3. Международные метрологические организации.....	19
2.4. Передача размеров единиц величин рабочим средствам измерений	22
2.5. Метрологическое обеспечение разработки, производства и применения средств измерений	26
2.6. Методы поверки (калибровки) средств измерений	33
3. Метрологические структурные схемы измерений	39
3.1. Содержание и этапы измерительных информационных технологий.....	39
3.2. Характеристики качества результатов измерений.....	42
3.3. Правила представления результатов измерений и характеристик погрешности	45
3.4. Статический и динамический режимы измерений	46
3.5. Общая метрологическая структурная схема прямых измерений Режим измерений статический	47
3.6. Частная метрологическая структурная схема прямых измерений. Средство измерений линейное	53
3.7. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью аналоговых средств измерений	57
3.8. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью цифровых средств измерений	60
3.9. Частный случай прямых измерений в динамическом ре- жиме с помощью цифровых средств измерений, средство измерений – $\Sigma\Delta$ АЦП.....	63
4. Метрологические характеристики средств измерений, подлежащие нормированию	73

4.1. Общие положения	73
4.2. Характеристики погрешности средств измерений	75
4.3. Характеристики преобразования измеряемой величины и сигналов измерительной информации	77
4.4. Характеристики взаимодействия с объектом и внешними средствами измерений	81
4.5. Метрологические характеристики аналоговых измерительных приборов	81
4.6. Метрологические характеристики цифровых измерительных приборов	84
4.7. Метрологические характеристики аналоговых измерительных преобразователей	87
4.8. Метрологические характеристики аналого-цифровых и цифроаналоговых измерительных преобразователей	89
4.9. Метрологические характеристики однозначных и многозначных мер	91
4.10. Классификация погрешностей средств измерений и результатов измерений	92
5. Метрологический анализ последовательного соединения измерительных преобразователей	95
5.1. Линейные измерительные преобразователи	95
5.2. Модель взаимного влияния измерительных преобразователей при их физическом соединении	98
5.3. Последовательное соединение нелинейного датчика с линеаризатором	99
5.4. Программное обеспечение средств измерений	106
6. Стандартизация	110
6.1. Значение стандартизации для общества	110
6.2. Государственная система стандартизации России	113
6.3. Требования к содержанию стандартов на процессы и на продукцию	116
6.4. Межгосударственная система стандартизации	119
6.5. Международное сотрудничество в области стандартизации...	121
7. Сертификация	122
7.1. Цели и значение сертификации	122
7.2. Организационная структура службы сертификации	123
7.3. Государственная регистрация, аккредитация и лицензирование	126
Приложение 1 Примеры погрешности применения средства измерений..	129
Приложение 2 Примерное содержание методики поверки (калибровки) средств измерений	135
Приложение 3 Требования к содержанию стандартов на продукцию	139

1. Введение.

1.1. Метрология и метрологическое обеспечение

Величина (*quantity*)- свойство (атрибут) физического объекта (явления, вещества, изделия, биологического объекта), которое может определяться количественно.

Размер величины (*size of a quantity*) - количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию “величина”.

Значение величины (*value of a quantity*) - выражение размера величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Единица величины (*unit of a quantity*)- величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице.

Измерение (*measurement*) - познавательный процесс, заключающийся в нахождении численного значения измеряемой величины (*of a measurand*) опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений.

Измеряемая величина (*measurand*) - величина, подлежащая измерению.

Средство измерений (*measuring instrument*) – техническое средство, предназначенное для выполнения измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Метрологическая характеристика – характеристика метрологических свойств средства измерений.

Метрология (*metrology*) - сфера деятельности и наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

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.

Соблюдение единства измерений обеспечивает взаимное доверие к результатам измерений, где бы они не проводились.

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, системы управления технологическими процессами, органы управления социумом или армией действуют по одинаковой общей схеме, представленной на рис. 1. Неверная или ложная информация, полученная на первой стадии, неизбежно приведет к неправильным действиям и, возможно, к катастрофическим последствиям. В технической, научной и других сферах первая стадия с частичным участием второй – это измерения.

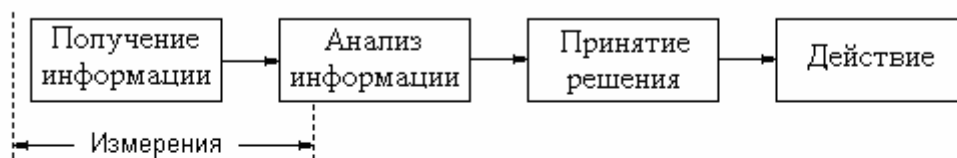


Рис. 1. Место измерений в технических системах управления, в испытаниях продукции, в экологическом мониторинге, в медицинской диагностике и других сферах деятельности.

Современные процессы измерений, доставляющие первичную информацию об объекте, входят в круг информационных технологий, а потому эти процессы мы будем впредь называть измерительными информационными технологиями (ИИТ).

Достижение единства измерений приводит к обеспечению взаимного доверия к результатам измерений вне зависимости от места их выполнения. Подобное состояние измерений приобретает особое значение для научного, технического и экономического сотрудничества и торговли, при разрешении спорных вопросов и претензий как внутри стран, так и на межгосударственном уровне. Не случайно поэтому первым межгосударственным соглашением в истории нашей планеты, подписанным 20 мая 1875 года, явилась Метрическая Конвенция, а первой межправительственной организацией - Международное Бюро Мер и Весов (МБМВ или в латинской аббревиатуре французского происхождения - BIPM).

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. Разнообразные функции, выполняемые для обеспечения единства измерений, в совокупности являются особой областью деятельности, именуемой метрологическим обеспечением.

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 за их исполнением,
- разработка и промышленный выпуск рабочих средств измерений,
- контроль за 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 за исполнением методик выполнения измерений,

- выполнение рабочих измерений во всех сферах деятельности и в отраслях народного хозяйства.

В настоящем курсе основное внимание уделяется последним четырем функциям, с которыми тесно связана будущая профессиональная деятельность учащихся. Точность результатов конкретных измерений определяется, во-первых, метрологическими свойствами средств измерений и, во-вторых, методикой измерений, которые выполняются в реальных условиях (*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 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 и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и(или) 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 (*reference conditions*).

Основным методом контроля за 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.

1.2. Стандартизация. Определение, цели и организационные основы

Стандартизация - деятельность по установлению норм, правил и характеристик (требований) в целях обеспечения

- безопасности продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества,
- безопасности хозяйственных объектов,
- технической и информационной совместимости, а также взаимозаменяемости продукции,
- единства измерений,
- качества продукции, работ и услуг,
- обороноспособности страны.

Государственное управление по стандартизации в Российской Федерации, а также по международному сотрудничеству в области стандартизации осуществляет Федеральное Агентство РФ по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) посредством формирования государственной политики в этой области, разработки программ по стандартизации, рассмотрения и утверждения проектов стандартов и иных нормативных актов общегосударственного значе-

ния, а также путем контроля соблюдения требований стандартов и иных нормативных документов.

Основные работы по разработке отечественных и международных стандартов, ведению фондов нормативных документов и контролю исполнения обязательных требований стандартов общегосударственного и международного значения подлежат обязательному государственному финансированию.

С 01 июля 2003 года в соответствии с Законом РФ "О техническом регулировании" исполнение стандартов является добровольным. Обязательными к исполнению являются технические регламенты, которые разрабатываются техническими и иными комитетами и комиссиями Государственной Думы или по ее поручению предприятиями, организациями и частными лицами. Утверждение технических регламентов и их пересмотр происходит на заседаниях Государственной думы в соответствии с регламентом ее работы.

1.3. Сертификация. Определение, цели и организационные основы

Сертификация - деятельность по подтверждению соответствия объекта сертификации установленным требованиям.

Объектами сертификации может быть продукция, услуги и иные объекты и виды деятельности, качество которых декларировано и нуждается в гарантированном обеспечении.

Обязательная сертификация осуществляется в случаях, предусмотренных законодательными актами Российской Федерации. Обязательной сертификации, в частности, подлежат все работы по обеспечению безопасности жизнедеятельности населения, а также оборудование, используемое в этой работе, в том числе, все средства, применяемые для измерения факторов, угрожающих безопасности.

Обязательная сертификация выполняется, как правило, уполномоченными на то государственными органами или организациями любой формы собственности при условии их аккредитации государственным органом управления.

Добровольная сертификация осуществляется по отношению к деятельности и объектам, не подлежащим обязательной сертификации и выполняется по инициативе юридических лиц и граждан на условиях договора между заявителем и органом по сертификации.

Добровольную сертификацию может осуществлять орган по обязательной сертификации, а также любое юридическое лицо, взявшее на себя такую функцию, установившее правила проведения соответствующих работ и зарегистрированное в Федеральном Агентстве РФ по стандартизации, метрологии и сертификации.

Государственное управление по сертификации продукции и услуг в Российской Федерации в соответствии с указанным Законом осуществляет упомянутое выше Федеральное агентство РФ через органы сертификации, образованные в установленном Законом порядке.

В связи с основной целью сертификации все измерения параметров объектов сертификации, которые объявлены изготовителем (продукции) или исполнителем (услуги), должны удовлетворять требованиям системы обеспечения единства измерений, их результаты должны быть взаимно признаваемыми всеми заинтересованными сторонами и арбитражными органами, а потому должны быть метрологически обеспечены и подлежат государственному метрологическому надзору в полном объеме.

1.4. Взаимосвязи между метрологией, стандартизацией и сертификацией

Из п.п. 1.1 - 1.3 видно, что деятельность по части метрологического обеспечения испытаний любого вида, в том числе, сертификационных, собственно процедура сертификации продукции, работ и услуг не может быть успешно реализована вне системы законодательных актов (законов РФ, постановлений, государственных органов, указов Президента РФ) и подчиненных им частных норма-

тивных документов, конкретизирующих общегосударственные акты применительно к отдельным многочисленным частным случаям (конкретным методикам измерений и испытаний, конкретным объектам сертификации). В качестве таких нормативных доку-

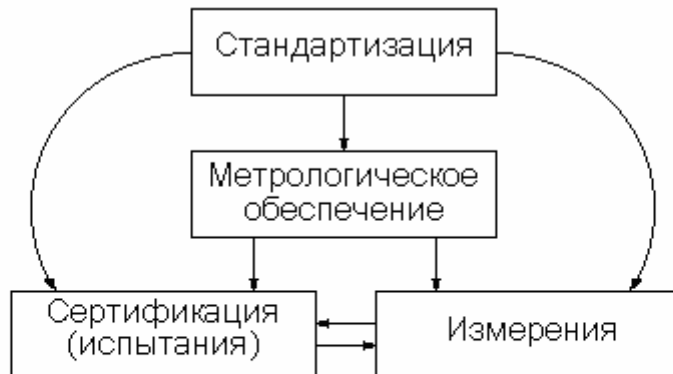


Рис. 2. Взаимосвязи между метрологией, стандартизацией и сертификацией

ментов выступают государственные стандарты, методические указания, методики, типовые программы испытаний изделий, технические условия на изделия и т.п. Примером непосредственной связи и взаимозависимости между метрологией, сертификацией и стандартизацией может служить система сертификации средств измерений, предназначенных для измерений при сертификационных испытаниях некоторого изделия по стандартизованной методике, которая, в свою очередь, должна быть подвергнута метрологической экспертизе в соответствии с действующими стандартами.

Описанные связи между стандартизацией, сертификацией и работами по метрологическому обеспечению, в том числе, практическими измерениями показаны на рис. 2.

2. Организационные и правовые основы обеспечения единства измерений

2.1. 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 Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии - 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 РФ,

- измерения, выполняемые при обязательной сертификации продукции и услуг,
- измерения, проводимые по поручению судебных и арбитражных органов,

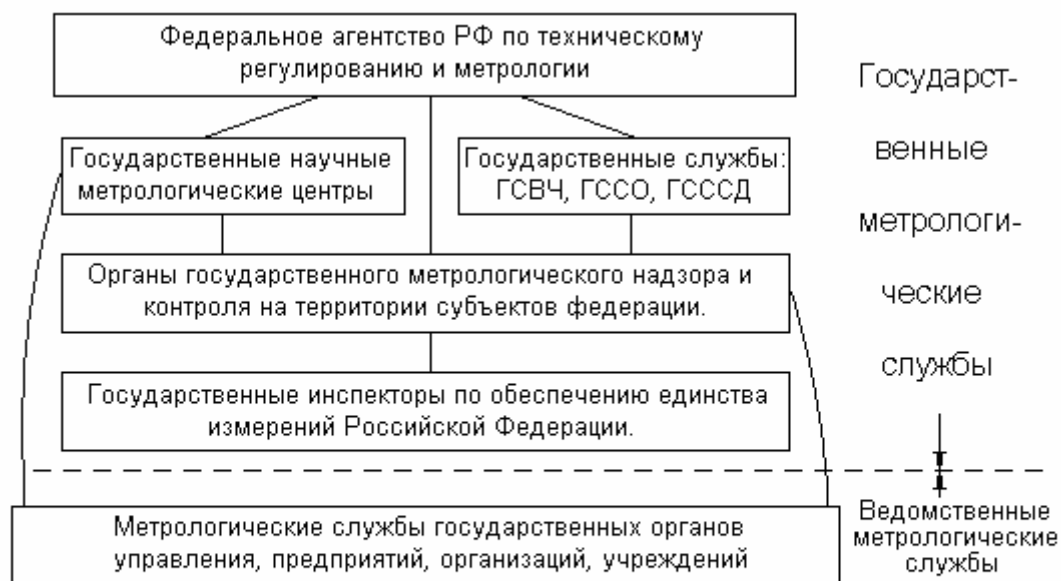


Рис. 3. Метрологические службы Российской Федерации

- 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. 3.

Функции органов метрологической службы, представленных на рис. 3, состоят в следующем.

Федеральное агентство РФ по техническому регулированию и метрологии

- координирует деятельность по обеспечению единства измерений в Российской Федерации, руководит деятельностью метрологических служб,
- устанавливает правила создания, утверждения, хранения и применения государственных эталонов,

- представляет правительству Российской Федерации проекты законодательных актов по вопросам обеспечения единства измерений и предложения по единицам величин, допускаемых к применению,
- определяет общие требования к средствам, методам и результатам измерений,
- 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.

Из приведенного перечня функций Росстандарта и научных метрологических центров следует, что основными сферами их деятельности являются *законодательная* и *теоретическая* (или *фундаментальная*) метрология.

Законодательная метрология - раздел метрологии, предметом которой является установление единых метрологических правил и норм, направленных на обеспечение единства измерений, а также контроль за их исполнением.

Теоретическая (фундаментальная) метрология - раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных научных основ метрологии.

Основной сферой деятельности метрологических органов, находящихся ниже на структурной схеме рис. 3, является *практическая (или прикладная) метрология*.

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

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

Органы государственной метрологической службы, действующие на территории субъектов федерации, осуществляют на этой территории государственный метрологический надзор и контроль за 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 России 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 Госстандарта России 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.

2.2. 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°C 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°C),
- 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,
- уголь,
- тепловой поток.

Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии (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.

Восточно - сибирский 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.

2.3. Международные метрологические организации

Международная научная и практическая деятельность по обеспечению единства измерений координируется несколькими международными организа-

циями, разграничивающими области своей компетенции по научно - техническому и территориальному признакам.

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

OIML - Organisation Internationale de Metrologie Legale (МОЗМ - Международная организация законодательной метрологии, 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 Standardization - ISO, Geneve, Switzerland)*. С другой стороны, в документах ИСО применяются метрологические рекомендации, разработанные МБМВ и МОЗМ.

Международная электротехническая комиссия - МЭК (International Electrotechnical Commission - IEC, Geneve, Switzerland), 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 - ИМЕКО, Budapest, Hungary)* 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.

2.4. 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 “Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение.”

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 и представлена на рис. 4.

Определения терминов, используемых в поверочных схемах, регламентированы МИ 2247-93 “Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения”.

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.

Государственный первичный 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 наивысшим эталоном.

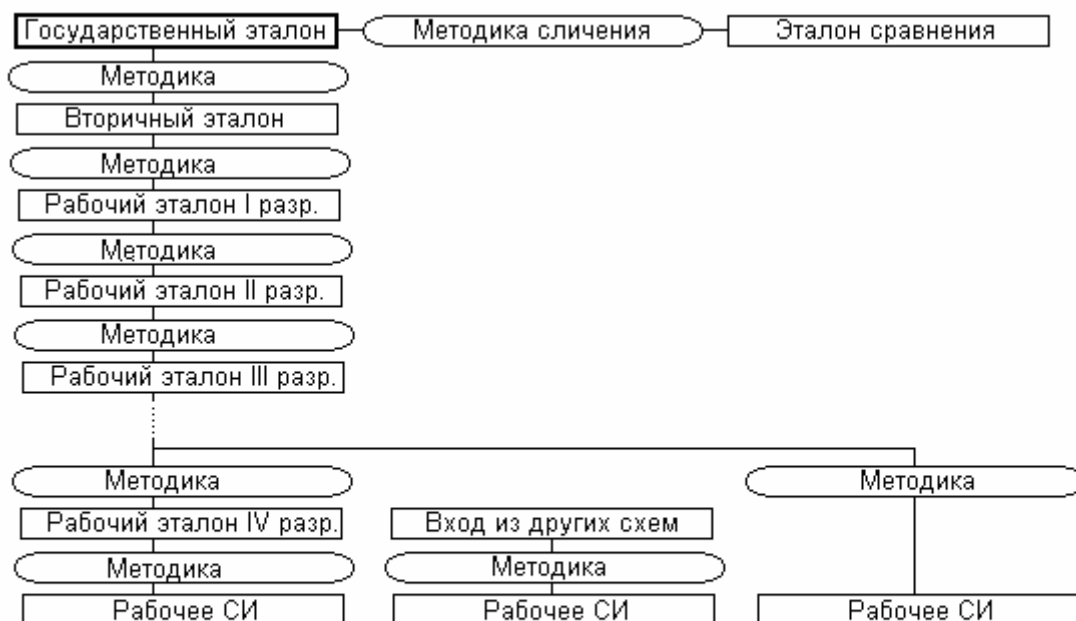


Рис. 4. Структура государственных поверочных схем

Две соседние ступени этой типовой схемы соединены методикой сличения, то есть методикой выполнения передачи единицы (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. 4).

Передача единицы (части шкалы) на самую нижнюю ступень выполняется при поверке (или калибровке) рабочего средства измерений. 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 “Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы. Основные положения” 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.

2.5. Метрологическое обеспечение разработки, производства и применения средств измерений

Решение задачи обеспечения единства измерений невозможно без метрологического надзора за установлением значений метрологических

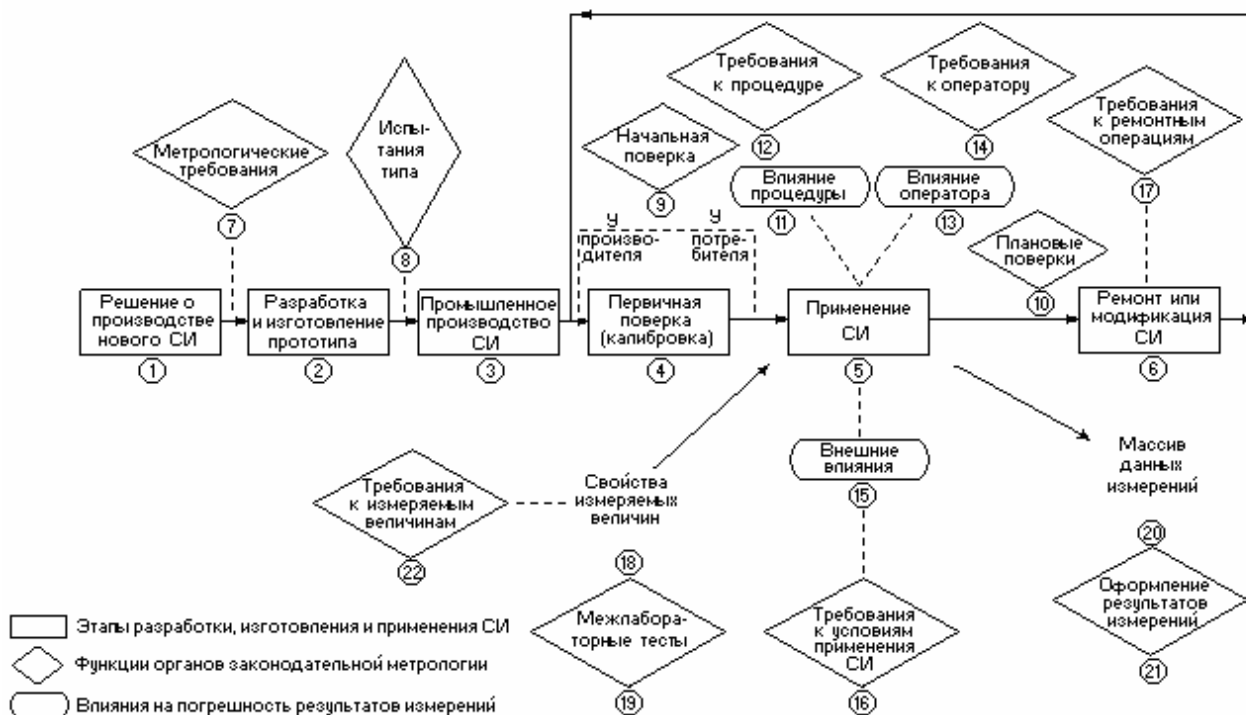


Рис. 5. Генеральная схема метрологического мониторинга средств измерений (по документу № 16 МОЗМ)

характеристик 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. 5 приведена структурная схема, иллюстрирующая эти принципы, которые не требуют специальных пояснений.

Эти принципы в полной мере соответствуют отечественной системе метрологического мониторинга разработки, испытаний, транспортирования, хранения и применения средств измерений, которая формировалась с развитием отечест-

венного приборостроения и метрологии и поддерживается традициями, законодательными актами, стандартами и иными нормативными документами Российской Федерации.

Ниже на рис. 6 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, подлежащих нормированию, и устанавливаются нормы на эти характеристики. Должны быть учтены следующие обстоятельства:

- условия применения будущего средства измерений,
- требования стандарта ГОСТ 8.009,
- требования стандарта ГОСТ 8.513 “Государственная система обеспечения единства измерений. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения”,
- при разработке ИИС - требования стандарта ГОСТ 8.596 “Государственная система обеспечения единства измерений. Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения”,
- 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.

контролю и надзору и(или) подлежит процедуре утверждения типа и занесению в государственный реестр средств измерений.

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 МИ 2178 “Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок разработки, рассмотрения, утверждения и регистрации рекомендаций по метрологии, утверждаемых НПО и НИИ Госстандарта”,

- требования ГОСТ 8.513,

- если разрабатывается ИИС, - требования ГОСТ 8.596.

Содержание раздела или документа "Методика поверки (калибровки)" приведено в приложении 3.

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 и (или) 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 представи-

тели иных организаций и предприятий по требованию органа, проводящего испытание.

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 интервала между периодическими поверками (см. также этап **11**),
- все перечисленное для рабочего эталона, если он разрабатывался.

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. Процедура утверждения, согласования и регистрации ТУ регламентирована ГОСТ Р 1.3 - 93 “Государственная система стандартизации. Порядок согласования, утверждения и регистрации технических условий”.

При отрицательном исходе испытаний возможны варианты решений:

- признать разработку бесперспективной,
- вернуть все материалы на доработку на один из этапов, показанных на схеме рис. 6.

6. Производство и выпуск средства измерений.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем:

- оснащения технологического процесса необходимыми средствами измерений, путем надзора и контроля за 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. 6).

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 за 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 8.467 “Государственная система обеспечения единства измерений. Нормативно-технические документы на методики выполнения измерений. Требования к построению, содержанию и изложению” и МИ 2377 “Государственная система обеспечения единства измерений. Разработка и аттестация методик выполнения измерений” с учетом рекомендации МИ 1967-89 “Государственная система обеспечения единства измерений. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения”,
- прогнозирования характеристик погрешностей результатов измерений, получаемых по этим методикам,
- выбора на основании этого прогноза подходящих средств измерений с учетом рекомендации МИ 1967-89,
- оценки характеристик погрешностей результатов измерений.

10., 11., 12. Операции надзора за 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 устанавливаются на этапе **5**. Длительность межповерочного интервала в зависимости от установленной стабильности свойств средств измерений может быть установлена 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” длительность межповерочного интервала может быть изменена с учетом состояния средства измерения, регистрируемого при периодических и иных поверках.

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, повреждении поверительного клейма, после ремонта и (или) регулировки) и т.п.

12. Инспекционная поверка - поверка, проводимая органом государственной метрологической службы при проведении государственного надзора за состоянием и применением средства измерений.

13. Ремонт или регулировка средства измерений.

После этого этапа средство измерений направляется на этап **11**.

2.6. Методы поверки (калибровки) средств измерений.

Поверка или калибровка средств измерений может быть выполнена *комплектно* или *поэлементно*. *Поэлементная поверка (калибровка)* применяется для многоэлементных средств измерений, состоящих из средств измерений, каждое из которых подвергается экспериментальной *комплектной поверке (калибровке)*, а метрологические характеристики многоэлементного средства измерений в целом определяются или контролируются путем расчета. Такой способ поверки применяется в тех случаях, когда невозможно или нецелесообразно реализовать эксперимент по комплектной поверке (калибровке) средства измерений в целом.

В дальнейшем будем рассматривать только комплектный способ поверки (калибровки), когда в одном эксперименте имеется возможность контролировать и измерять входной и выходной сигналы поверяемого (калибруемого) средства измерений.

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

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)*" заданы дискретные значения показаний прибора, при которых следует выполнить поверку. Обозначим эти показания через $y_0, y_1, \dots, y_j, \dots, y_k$. Обычно $k = (5 \div 10)$. 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 $j = 1, 2, \dots, k$.

На рис. 7 показаны схемы экспериментов, реализующих методы поверки (калибровки) "*по мере*" и "*по образцовому прибору*".

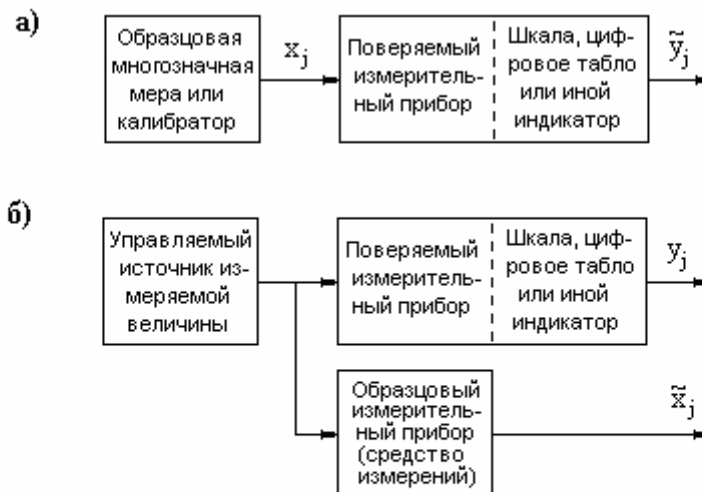


Рис. 7. Схемы поверки измерительного прибора методом "по мере" а) и методом "по образцовому прибору" б)

При поверке (калибровке) "по мере" на вход поверяемого прибора от многозначной меры или от калибратора последовательно подаются заданные значения измеряемой величины $x_0 = y_0, x_1 = y_1, \dots, x_j = y_j, \dots, x_k = y_k$ (прямой ход). Погрешность воспроизведения этих значений не должна превышать $1/5 \div 1/3$ от ожидаемого предела допускаемой погрешности поверяемого прибора. Условия поверки - нормальные.

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 $\Delta y_j = \tilde{y}_j - y_j$ или, что то же самое, $\Delta y_j = \tilde{y}_j - x_j, j = 1, 2, \dots, k$, 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.

Для выявления вариации (гистерезиса, сухого трения) в крайней верхней точке диапазона после достижения максимального значения y_k значение входной величины увеличивают на $(10 \div 20)\%$, вновь устанавливают $x_k = y_k$, и продолжают эксперимент в обратной последовательности (обратный ход). При обратном ходе обеспечивается плавный подход к каждому заданному значению y_k сверху. Таким образом будет завершён один цикл измерений, состоящий из прямого и обратного хода.

При наличии у поверяемого прибора случайной погрешности выполняется n циклов измерений. Тогда при каждом значении $x_j = y_j$ будет получено $2n$ значений погрешности Δy_{ji} . Для вычисления характеристик погрешности эти значения необходимо обрабатывать 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 точность отсчитывания погрешностей (то есть их округление) может достигать 100%, поэтому достоверность определения и контроля погрешностей будет низкой.

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

При поверке (калибровке) по этому методу на вход испытываемого прибора значение измеряемой величины подается от регулируемого, но стабильного источника. Регулировкой входной величины добиваются того, чтобы показания испытываемого 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. Пусть \tilde{x}_j - показания образцового прибора. Тогда в каждой j – ой точке абсолютная погрешность испытуемого прибора, приведенная к его входу, равна $\Delta y_j = y_j - \tilde{x}_j, j = 1, 2, \dots, k$. Условия поверки - 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. 7 (см. рис. 8).



Рис. 8. Схемы поверки измерительного преобразователя методом "по мере" а) и методом "по образцовому прибору" б)

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

- значения выходного сигнала $y_0, y_1, \dots, y_j, \dots, y_k$, 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 $f(x_j) = y_j$.

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 :

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

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} , $i = 1, 2, \dots, 2n$.

Для поверки (калибровки) измерительных преобразователей методом "по мере" в документе "Методика (Инструкция по) поверки (калибровки)" должны быть указаны значения входной величины $x_0, x_1, \dots, x_j, \dots, x_k$, которые задаются мерой или калибратором, и расчетные значения выходной величины y_j , вычисляемые по номинальной функции преобразования: $y_j = f(x_j)$ для каждого $j = 0, 1, 2, \dots, k$. Значения x_j плавно без перебросов устанавливаются поочередно сначала в сторону увеличения (прямой ход), затем, после небольшого превышения x_k - в сторону уменьшения (обратный ход). При каждом установленном значении x_j вычисляются погрешности $\Delta y_j = \tilde{y}_j - y_j$, где \tilde{y}_j - результат измерения выходной величины образцовым средством измерения.

Как и ранее, при необходимости выполняется n циклов измерений, в результате которых при каждом j будут получены $2n$ значений погрешностей Δy_{ji} , $i = 1, 2, \dots, 2n$, приведенных к выходу поверяемого преобразователя. Все полученные значения погрешностей подвергаются обработке методами математической статистики.

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 $(1/5 \div 1/3)$ от предполагаемой погрешности поверяемого измерительного преобразователя.

Условия поверки (калибровки) должны удовлетворять требованиям к нормальным условиям эксплуатации всех средств измерений, участвующих в поверке (калибровке).

3. Метрологические структурные схемы измерений

3.1. Содержание и этапы измерительных информационных технологий

В дальнейшем будем различать 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.

Последовательность этапов прямых измерений представлена на рис. 9 а).

Первым этапом перед планированием и выполнением любой измерительной процедуры является формализация и составление математической модели объекта измерений и измеряемой величины. Только тогда можно охарактеризовать в качестве измеряемой величины тот или иной параметр этой модели. Так, перед измерением диаметра стержня необходимо представить его, как круглый цилиндр 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 измеряемую величину: среднюю по объему, как минимальную и максимальную, или как температуру в какой-либо точке объема. На следующем этапе

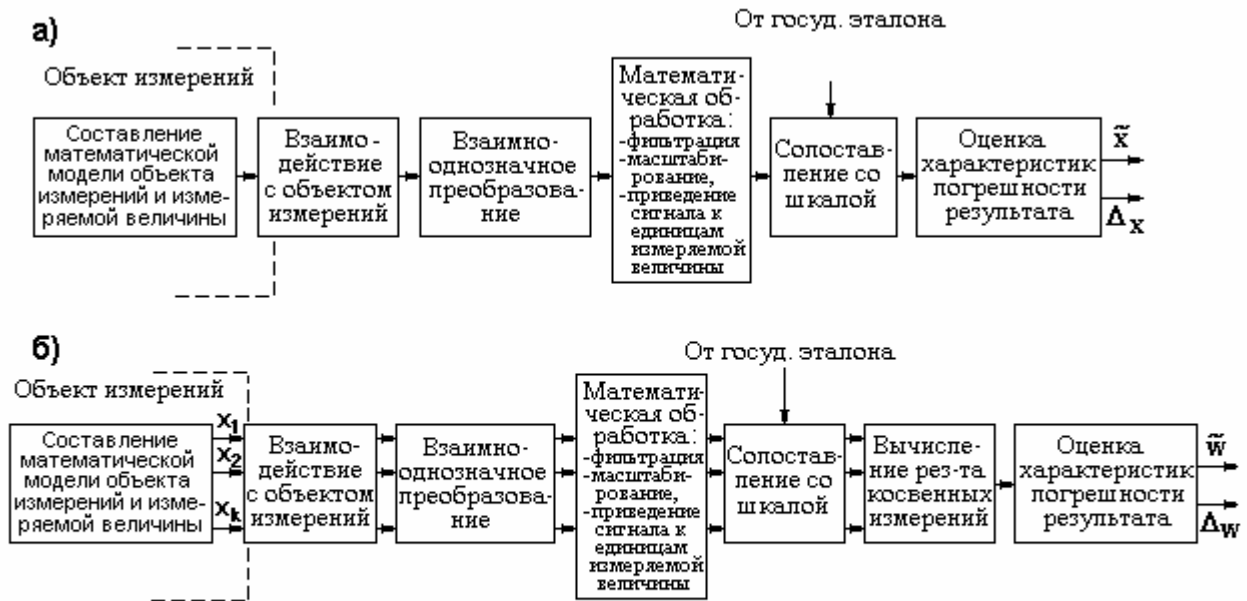


Рис. 9. Этапы выполнения прямых а) и косвенных б) измерений

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 искажает как объект, так и метрологические свойства средства измерений, что приводит к потере части информации.

В связи с изложенным это 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 другим.

Примеры погрешности от взаимодействия средства измерений с объектом приведены в приложении 1.

Сигнал измеряемой величины, воздействующий на чувствительный элемент измерительного инструмента, порождает реакцию этого инструмента в виде сиг-

нала измерительной информации, который должен быть связан с сигналом измеряемой величины взаимнооднозначной стабильной функциональной зависимостью.

Сигнал измерительной информации обычно подвергается преобразованиям, таким, как фильтрация, усиление, ослабление, нелинейному преобразованию, преобразованию в цифровой код, пригодный для дальнейшей математической обработки. Все эти преобразования должны быть взаимнооднозначными, стабильными во времени, не зависящими от действия внешних мешающих факторов.

Последующая математическая обработка имеет целью приведение сигнала измерительной информации к размерности измеряемой величины и к такому размеру, чтобы обеспечить уверенное сопоставление со шкалой измеряемой величины. Эта шкала формируется благодаря выполнению поверки или калибровки, связывающей ее с государственным эталоном, который хранит единицу измеряемой величины.

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.

Этапы выполнения косвенных измерений представлены на рис. 9 б). От процедуры прямых измерений она отличается добавлением этапа вычисления результата косвенного измерения $\tilde{w} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k)$, где $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k$ - результаты прямых измерений. Понятно, что здесь перед планированием и выполнением косвенных измерений важно составить более подробную модель объекта измерений, которая должна содержать те самые соотношения между параметрами объекта, которые будут использованы на этапе вычисления результатов косвенных измерений. И здесь в обязательном порядке результат измерения должен сопровождаться сообщением о характеристике погрешности Δ_w .

3.2. Характеристики качества результатов измерений

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

- несовершенство средств измерений,

- некорректное применение средств измерений, в результате которого могут изменяться свойства объекта и метрологические свойства средств измерений,
- воздействие на средство измерений разнообразных мешающих внешних (механических, климатических и других) факторов, называемых *влияющими величинами*.

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

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 (Δ_H, Δ_B) , ограниченный предельными или предельно допускаемыми значениями. Обычно принимают $\Delta_H = -\Delta_B = -\Delta_X$, то есть считают этот интервал симметричным относительно нуля: $(-\Delta_X, \Delta_X)$.

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, 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 ($-\Delta_X, +\Delta_X$), чтобы интервал, лежащий между ними, содержал сумму обеих составляющих погрешности с вероятностью $P_0 = (0,8 \div 0,95)$. Математическая запись этого интервала имеет вид:

$$P(-\Delta_X \leq \Delta x \leq \Delta_X) = P_0,$$

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 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. 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 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 погрешности на величину второго порядка малости по сравнению с погрешностью:

$$\begin{aligned} \gamma_x &= \frac{\Delta x}{\tilde{x}} = \frac{\Delta x}{x + \Delta x} = \frac{\Delta x}{x} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)} = \frac{\Delta x}{x} \left(1 - \frac{\Delta x}{x} + \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 - \dots\right) = \\ &= \frac{\Delta x}{x} - \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \dots \approx \frac{\Delta x}{x} \end{aligned}$$

Цели составления метрологических структурных схем измерений:

- анализ мест и причин возникновения погрешности результата измерений
- получение расчетных формул для оценки характеристик погрешности результатов измерений.

3.3. Правила представления результатов измерений и характеристик погрешности

Результат измерения представляется именованным числом, выраженным в единицах измерения измеряемой величины x ,

Характеристика абсолютной погрешности выражается именованным числом в единицах измерения измеряемой величины.

Характеристика относительной погрешности (в том числе - приведенной) должна выражаться в процентах.

При измерениях, выполняемых с применением современных средств вычислительной техники, результаты измерений и их погрешности предъявляются пользователю с избыточным количеством цифр. 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 $8,352487963 \text{ В}$,
а оценка предельной абсолютной погрешности $0,003567825 \text{ В}$.

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 цифрой, 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. Поэтому в соответствии с действующей нормативной документацией число, обозначающее предельное значение погрешности (неопределенности) результата, не должно содержать более двух значащих цифр, вторая из которых обычно равна 5.

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

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 $\pm A$. Интервал с несимметричными границами следует представлять указанием обеих границ : $[A, B]$. Такое же представление пригодно для интервалов с симметричными границами : $[-A, A]$.

3.4. Статический и динамический режимы измерений

Различают два режима измерений: статический и динамический.

Статический режим измерений возникает тогда, когда измеряемая величина не изменяется во времени или, во всяком случае, ее изменение во времени не влияет заметным образом на погрешность результата измерения. Поэтому при метрологическом анализе измерений в статическом режиме считается, что измеряемая величина и метрологические свойства средств измерений не зависят от времени.

Измерения, выполняемые в динамическом режиме, отличаются тем, что изменение во времени измеряемой величины приводит к существенному увеличению погрешности результатов, пренебречь которым нельзя. В этом случае для метрологического анализа результатов измерений приходится применять характеристики быстродействия средств измерений, то есть, *динамические характеристики*. Эти характеристики представляют собой описание реакции средств измерений на переменные во времени входные сигналы.

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 - режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины, существенны

по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

3.5. Общая метрологическая структурная схема прямых измерений. Режим измерений статический

На рис. 10. приведена метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме для общего случая применения нелинейных средств измерений.

Данная схема пригодна для анализа измерений, выполняемых как аналоговыми, так и цифровыми средствами измерений, в том числе, отдельными измерительными каналами ИИС.

На рис. 10 обозначено:

x - истинное значение измеряемой величины,

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

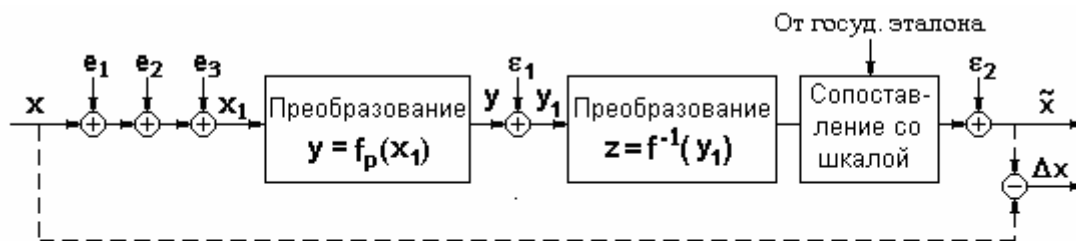


Рис. 10. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме

e_2 - погрешность, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом,

e_3 - погрешность, вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами,

$y = f_p(x)$ - 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, $\Delta x = \tilde{x} - x$.

Различие между функциями $y = f_p(x)$ и $y = f(x)$ вызвано неточностью воспроизведения функции $y = f_p(x)$ 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 через $\Delta f(x) = f_p(x) - f(x)$. Эта разность случайна на множестве экземпляров средств измерений одного типа, и в целях обеспечения надлежащего метрологического качества должна быть ограничена пределами допустимых различий $(-\Delta_f, +\Delta_f)$ между этими функциями для всех значений измеряемой величины из диапазона измерения:

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f.$$

Это неравенство ограничивает область, в которой должны находиться функции преобразования всех средств измерений, признаваемых пригодными к

применению. Пример такой области приведен на рис.11.

Значение Δ_f должно быть указано в технической документации на средство измерений.

Естественными требованиями, предъявляемыми к функциям преобразования средств измерений, являются требования монотонности (а, следовательно, взаимной однозначности преобразования) и гладко-

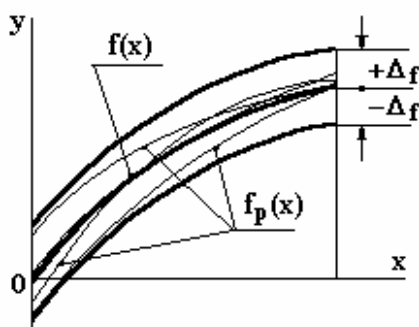


Рис.11. Пример области допустимого разброса функций преобразования средств измерений одного типа

сти, то есть ограниченности модуля производных. Однако, с другой стороны, производная функции преобразования - это *чувствительность* средства измерений:

$$S = df_p(x) / dx \cong df(x) / dx, \quad (1)$$

которая не должна равняться нулю.

Близость производных функций $y = f_p(x)$ и $y = f(x)$ можно выразить неравенством

$$\left| \frac{f'_p(x)}{f'(x)} - 1 \right| \leq \delta, \quad (2)$$

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

Для удобства дальнейших рассуждений обозначим:

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

и назовем погрешность e погрешностью применения, поскольку она возникает только при применении средства измерений и представляет собой различие между погрешностью средства измерений и погрешностью результата измерений.

Тогда, пользуясь схемой рис.10, запишем выражение для абсолютной погрешности результата прямого измерения, выполняемого подобным средством:

$$\Delta x = f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) + \varepsilon_2 - x$$

и перегруппируем слагаемые:

$$f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) = \Delta x + x - \varepsilon_2.$$

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

$$f_p(x + e) + \varepsilon_1 = f(x + \Delta x - \varepsilon_2),$$

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:

$$f'(x) \cdot \Delta x = f_p(x) - f(x) + f'_p(x) \cdot e + f'(x) \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_1.$$

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 $f'(x)$:

$$\Delta x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \varepsilon + e, \quad (3)$$

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

Первое и второе слагаемые, находящиеся в правой части равенства (3), порождены собственными свойствами средства измерений, поэтому сумма

$$\Delta_{инст}x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2 \quad (4)$$

называется *инструментальной составляющей абсолютной погрешности* или *инструментальной погрешностью*. При выпуске средства измерений из производства, при его транспортировании, хранении и эксплуатации инструментальная погрешность не должна превышать (может быть, с некоторой вероятностью) некоторого заранее установленного значения Δ_x . Значение Δ_x нормы погрешности $\Delta_{инст}x$, устанавливается при проектировании средства измерений и сообщается пользователю в сопроводительной технической документации. Процесс установления нормы на инструментальную погрешность называется *нормированием характеристики инструментальной погрешности средства измерений*. Норма погрешности Δ_x является метрологической характеристикой средства измерений.

Ответственность за инструментальную погрешность несет разработчик и производитель средства измерений.

Ответственность за погрешность применения несет пользователь средства измерений.

Как уже упоминалось ранее, последнее слагаемое в правой части равенства (3) порождено причинами, возникающими только при применении средства измерений, а именно, взаимодействием с объектом, неадекватностью принятых математических моделей измеряемой величины и объекта, пульсациями и помехами, источником которых является объект. Это слагаемое составляет *различие между погрешностями средства измерений и погрешностями результата измерений*, и за него несут ответственность пользователи средства измерений.

Поэтому погрешность $e = e_1 + e_2 + e_3$ называется *погрешностью применения* средства измерений. Оценку характеристики погрешности применения для

конкретных условий выполняет пользователь средства измерений. Норма на эту погрешность, как правило, не устанавливается.

Поскольку значение погрешности результата каждого измерения определено быть не может, поэтому на практике пользуются оценками интервальных характеристик погрешности. Исходными данными для расчета характеристики абсолютной погрешности результата измерений в виде границ интервала неопределенности $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$ могут быть только предельно допускаемые значения Δ_f и Δ_ε составляющих абсолютной инструментальной погрешности, которые должны быть сообщены пользователю в технической документации на средство измерений. Гарантии в отношении сохранности этих характеристик обеспечивает изготовитель средства измерений и контролирующие метрологические органы. Предельно возможные границы $(-\Delta_e, +\Delta_e)$ погрешности e определяются пользователем в привязке к конкретным условиям измерений.

Итак, если эти исходные данные известны, то есть, если известно (может быть, с некоторой вероятностью), что

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f, \quad |\varepsilon| = \left| \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon, \quad |e| \leq \Delta_e,$$

то об абсолютной погрешности результата измерений на основании равенства (4) можно заключить, что ее значения не должны выходить за пределы, которые определяются неравенством

$$|\Delta x| \leq \frac{\Delta_f}{f'(x)} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (5)$$

Таким образом границы интервала остаточной неопределенности значения измеряемой величины суть $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$, где

$$\Delta_x = \frac{\Delta_f}{f'(x)} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon, \quad (6)$$

\tilde{x} - результат измерения.

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой величины, лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах $(-\Delta_{инст}, +\Delta_{инст})$, где

$$\Delta_{инст} = \frac{\Delta_f}{f'(x)} + \Delta_\varepsilon. \quad (7)$$

В рассмотренном общем случае удобно устанавливать норму $\gamma_{отн}$ на относительную инструментальную погрешность средства измерений или норму $\gamma_{прив}$ на погрешность, отнесенную к наибольшему значению измеряемой величины в диапазоне измерения. Такие нормы выражаются в процентах:

$$\left| \frac{\Delta_{инст} x}{x} \right| \cdot 100\% \leq \frac{\Delta_{инст}}{x} \cdot 100\% = \frac{\Delta_f}{x \cdot f'(x)} \cdot 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} \cdot 100\% = \gamma_{отн}, \quad (8)$$

$$\left| \frac{\Delta_{инст} x}{x_{max}} \right| \cdot 100\% \leq \frac{\Delta_{инст}}{x_{max}} \cdot 100\% = \frac{\Delta_f}{x_{max} \cdot f'(x)} \cdot 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{max}} \cdot 100\% = \gamma_{прив}. \quad (9)$$

3.6. Частная метрологическая структурная схема прямых измерений.

Средство измерений линейное

Метрологическая схема измерений в этом случае существенно упрощается (см. рис. 12).

Поскольку здесь $f_p(x) = K_p \cdot x$, $f(x) = K \cdot x$, $f'_p(x) = K_p$, $f'(x) = K$, $\Delta f(x) = f_p(x) - f(x) = K_p \cdot x - K \cdot x = \Delta K \cdot x$, выражение (3) для абсолютной погрешности результата измерений приобретает вид

$$\Delta x = \frac{\Delta K}{K} \cdot x + e + \varepsilon, \quad (10)$$

где $\Delta K = K_p - K$ - абсолютная погрешность коэффициента преобразования,

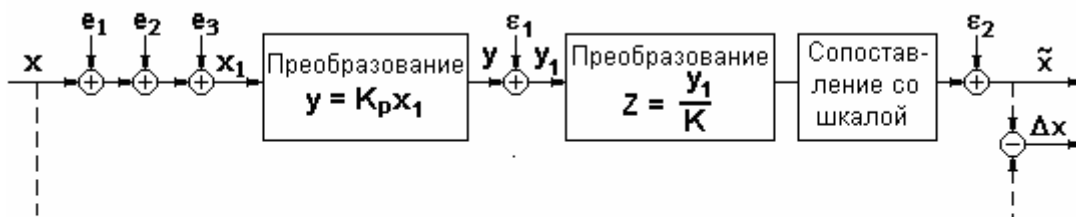


Рис.12. Метрологическая структурная схема прямых измерений.
Средство измерений линейное.

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 (10) 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 рождению собственными свойствами средства измерений, и это слагаемое является *аддитивной погрешностью средства измерений*. Точно так же исключительно свойствами средства измерений порождена мультипликативная составляющая погрешности (10). В связи с этим *инструментальная составляющая абсолютной погрешности* или *инструментальная погрешность* равна

$$\Delta_{инст}x = \frac{\Delta K}{K} \cdot x + \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \quad (11)$$

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

$$|K_p - K| = |\Delta K| \leq \Delta_K.$$

При выполнении этого условия разброс функций преобразования подобных средств измерений на множестве однотипных экземпляров будет иметь вид, показанный на рис. 13.

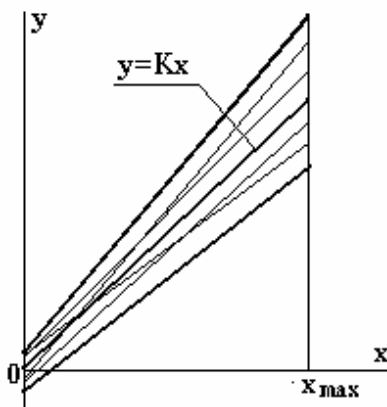


Рис. 13. Пример разброса функций преобразования линейных средств измерений

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:

$$\Delta_x \leq \frac{\Delta_K}{K} \cdot x + \Delta_e + \Delta_\varepsilon, \quad (12)$$

где Δ_ε - предельное значение аддитивной погрешности:

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

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах $(-\Delta_{инст}, +\Delta_{инст})$, где

$$\Delta_{инст} = \frac{\Delta_K}{K} \cdot |x| + \Delta_\varepsilon. \quad (13)$$

Предельное значение γ_x относительной погрешности результата измерений выражается формулой

$$\left| \frac{\Delta x}{x} \right| \leq \gamma_x = \frac{\Delta_K}{K} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} + \frac{\Delta_e}{x}, \quad (14)$$

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. 14, где x_{max} - верхний предел диапазона измерения.

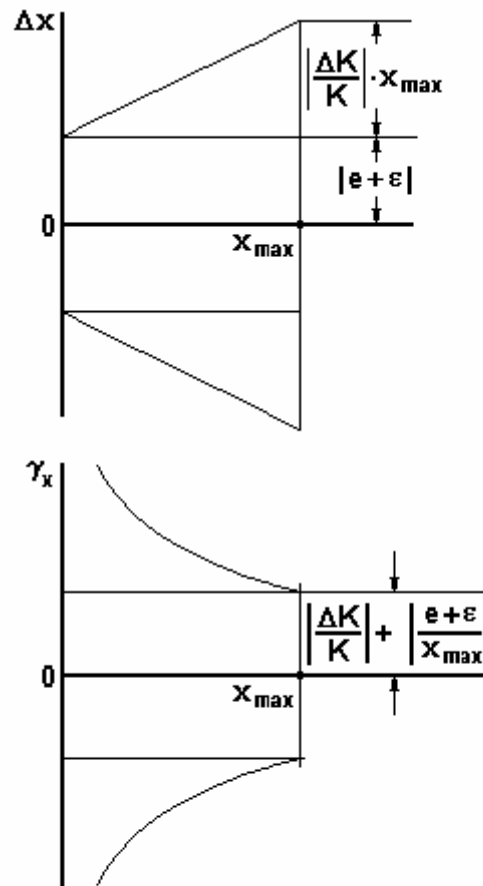


Рис. 14. Характеристики погрешности измерений

В нижней части рис. 14 показана область возможных значений относительной погрешности.

В рассмотренном случае оказывается удобным установить отдельные 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*):

$$\left| \frac{\Delta K}{K} \right| \cdot 100\% \leq \gamma_K, \quad (15)$$

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

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

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

$$\left| \frac{\Delta_{инст}}{x} \right| \cdot 100\% \leq c + d \left(\left| \frac{x_{max}}{x} \right| - 1 \right), \quad (16)$$

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

$$d = \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{max}} \right| \cdot 100\%, \quad c = \left(\left| \frac{\Delta_K}{K} \right| \cdot 100\% + d \right). \quad (17)$$

На лицевой панели средства измерений и(или) в технической документации приводится либо двучленная формула, либо ее коэффициенты в виде

$$c/d,$$

где всегда $c > d$.

Раскрывая скобки в (16) с учетом обозначений (17), получим ограничение, накладываемое этой формулой на относительную инструментальную погрешность средства измерений:

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

что согласуется с (13). Сравнение зарубежных и отечественных методов нормирования показывает, что при отечественном нормировании пользователю предоставляется более наглядная и полная информация об инструментальной погрешности средства измерений.

3.7. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью аналоговых средств измерений

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

$$y(t) = \int_0^t k(t - \tau) x_1(\tau) d\tau, \quad (18)$$

где $k(t - \tau)$ называется ядром оператора, а в теории измерений и автоматического управления - *импульсной переходной функцией* или *весовой функцией*. Это преобразование показано на метрологической структурной схеме рис. 15, где использованы все обозначения, принятые ранее в п. 3.2. 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

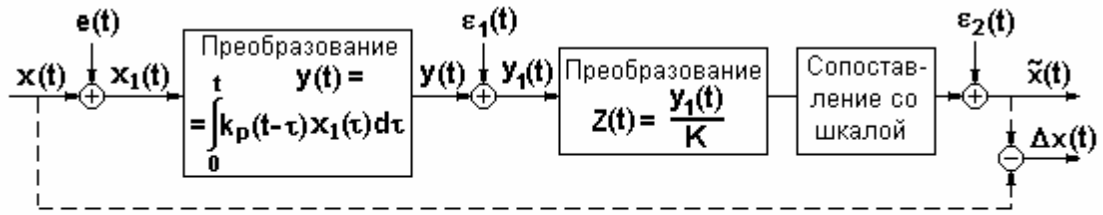


Рис.15. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное аналоговое.

выше в п. 3.2. 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 , принятым в качестве номинального для данного средства измерений. 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 погрешность расшифровки.

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

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

откуда

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \cdot \left[\int_0^t k_p(t-\tau) \cdot x(\tau) d\tau - K \cdot x(t) \right] + \frac{1}{K} \cdot \int_0^t k_p(t-\tau) \cdot e(\tau) d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t). \quad (19)$$

Применяя к этому равенству преобразование Фурье, получим выражение для комплексного спектра погрешности измерения через спектры сигналов и реальную комплексную частотную характеристику преобразователя $K_p(j\omega)$:

$$\Delta x(j\omega) = \frac{1}{K} [K_p(j\omega) - K] \cdot x(j\omega) + \frac{K_p(j\omega)}{K} \cdot e(j\omega) + \frac{\varepsilon_1(j\omega)}{K} + \varepsilon_2(j\omega), \quad (20)$$

где частотные характеристики суть преобразования Фурье соответствующих импульсных переходных характеристик:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad K_p(j\omega) = \int_0^{\infty} k_p(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

Как видно, структура правой части равенств (19) и (20) аналогична структуре правых частей равенств (3), (4) п. 3.2. Мало того, равенство (3) есть частный случай (19) и (20), поскольку при неизменной во времени измеряемой величине (или неизменном сигнале измерительной информации), то есть при $\omega = 0$

$$K(0) = \int_0^{\infty} k(t) dt = K, \quad K_p(0) = \int_0^{\infty} k_p(t) dt = K_p,$$

$$\int_0^t k_p(t-\tau) \cdot x \cdot d\tau = x \cdot K_p, \quad \int_0^t k_p(t-\tau) \cdot e \cdot d\tau = e \cdot K_p.$$

Первые слагаемые в правой части каждого из равенств (19) и (20) представляют собой погрешности, вызванные двумя причинами: разбросом импульсных переходных характеристик и комплексных частотных характеристик на множестве экземпляров и их нестабильностью, а также отличием реального преобразования от идеального безинерционного, то есть такого, когда частотная характеристика практически не отличается от единицы, и тогда форма сигнала $x(t)$ не искажается. Эта вторая причина вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения мгновенных значений быстропеременных величин, если их спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя.

Вторые слагаемые в формулах (19) и (20) своим происхождением обязаны погрешности применения, которая претерпела то же преобразование, что и измеряемая величина, и если ее спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя, то она частично фильтруется. Получившаяся в результате составляющая погрешности измерения называется *наследственной погрешностью*.

Последние два слагаемых каждого из равенств (19) и (20) образуют в сумме собственную аддитивную абсолютную погрешность средства измерений.

3.8. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью цифровых средств измерений

Данная метрологическая структурная схема приведена на рис. 16 и отличается от предыдущей 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 .

Смещение моментов дискретизации Δt_i называется *погрешностью датирования отсчетов*. Эта погрешность порождается затратами времени на аналого-цифровое преобразование, в общем случае она непостоянна и зависит от

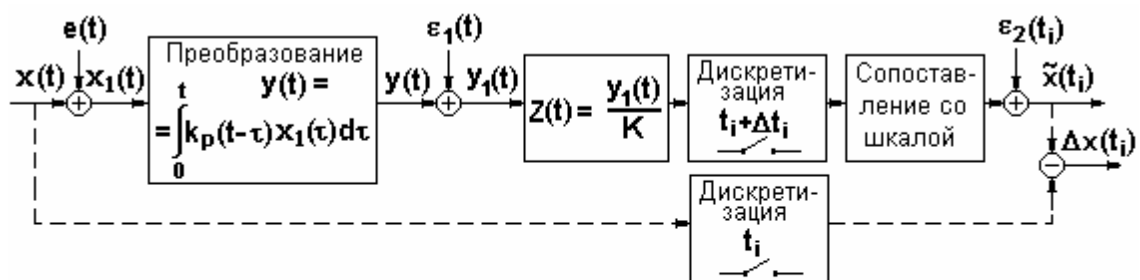


Рис. 16. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное цифровое.

значения измеряемой величины. Несмотря на смещение моментов измерения относительно расписания, результаты измерений регистрируются, как относящиеся к заданным моментам времени t_i . Но за время Δt_i значение измеряемой величины изменяется, в силу чего возникает погрешность измерения мгновенного значения изменяющейся величины, именуемая *апертурной погрешностью*, которая 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 аналого-цифрового преобразования может быть существенно снижена за счет применения перед АЦП специальных устройств, а именно, "устройств выборки-хранения" (УВХ).

Апертурная погрешность равна нулю при измерении неизменных во времени величин.

В данном случае для погрешности измерений, как функции времени, применимо выражение (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

$$\tilde{N} = 10^{-n} Ent[f_p(x) \cdot 10^n], \quad N = 10^{-n} Ent[f(x) \cdot 10^n]. \quad (21)$$

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

$$\tilde{N} = 2^{-n} Ent[f_p(x) \cdot 2^n], \quad N = 2^{-n} Ent[f(x) \cdot 2^n], \quad (22)$$

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

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 (21) и (22). Наиболее распространенными являются линейные цифровые средства измерений, номинальная функция преобразования которых есть $N = 2^{-n} Ent[K \cdot x \cdot 2^n]$. В специальных случаях могут применяться квадратичные ($f(x) = K \cdot x^2$) и логарифмические ($f(x) = K \cdot \log x$) цифровые средства измерений.

Примеры функций преобразования цифровых средств измерений приведены на рис. 17, 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 $f_p(x)$ от $f(x)$, и собственной аддитивной погрешности в составе инстру-

ментальной погрешности цифровых средств измерений непременно присутствует погрешность округления, не превышающая значения цены младшего разряда выходного кода.

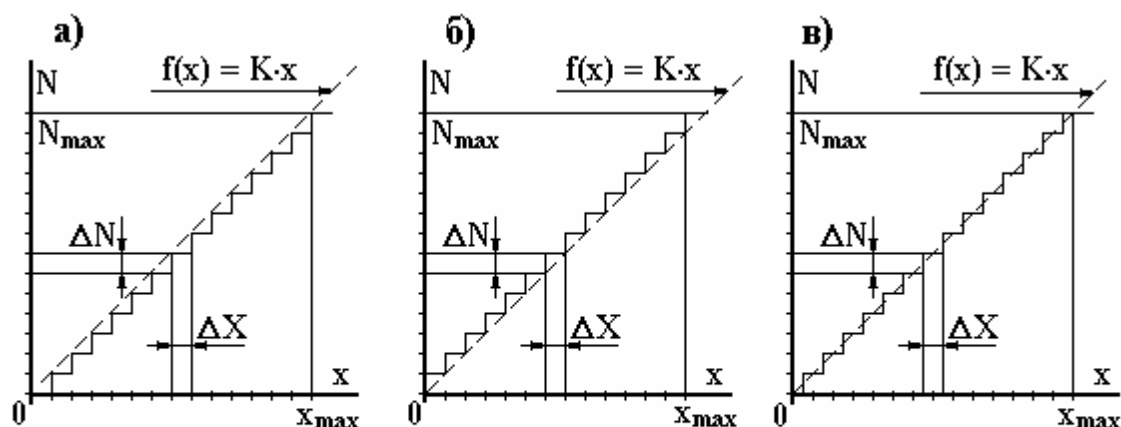


Рис.17. Примеры функций преобразования цифровых измерительных приборов и АЦП.

Три примера, показанные на рис.17, демонстрируют три варианта расположения реальной ступенчатой функции преобразования по отношению к номинальной. Наиболее выгодным является показанное на рис.17 в) размещение ступенчатой функции со сдвигом на половину цены деления младшего разряда.

Функции преобразования цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) обратны функциям цифровых приборов и АЦП, и точно так же являются ступенчатыми (см. рис. 18).

У ЦАП длина каждой ступеньки функции преобразования ΔN есть единица младшего разряда входного кода, а высота ступеньки ΔX - цена единицы младшего разряда входного кода, которая выражается в единицах выходной величины.

Показателем и характеристикой линейности цифровых измерительных приборов, АЦП и ЦАП является постоянство цены единицы младшего

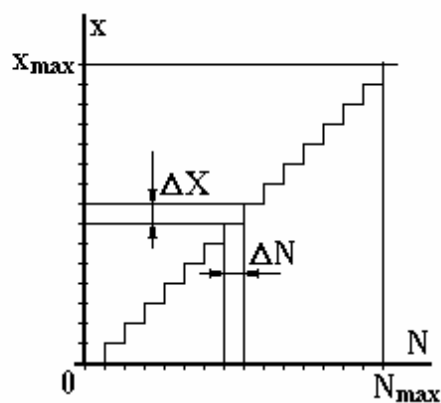


Рис.18. Пример функции преобразования линейного ЦАП

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 (24) и (25) от линейной) также может нормироваться.

3.9. Частный случай прямых измерений в динамическом режиме с помощью цифровых средств измерений, средство измерений – $\Sigma\Delta$ АЦП

$\Sigma\Delta$ АЦП представляет собой разновидность интегрирующих аналого-цифровых преобразователей, выполняющих интегрирование и усреднение результата интегрирования на конечном интервале времени. В таких АЦП мгновенное значение изменяющегося входного напряжения $U(t)$, по сути дела, преобразуется в изменяющуюся частоту импульсов $f(t)$ линейно: $f(t) = K \cdot U(t)$. Это преобразование побуждается тактирующим генератором, частота которого f_T достигает десятков мегагерц. Интегрирование и усреднение осуществляется путем счета количества импульсов частоты $f(t)$ в течение постоянного времени интегрирования t_{II} и последующего деления на t_{II} . В результате на выходе получается значение средней частоты на интервале t_{II} . За счет того, что частота тактирующих импульсов гораздо выше, чем $1/t_{II}$, результат счета с высокой степенью точности может быть записан, как интеграл: $N = K \int_{t_i}^{t_i + t_{II}} U(t) dt$. Этот результат делится на значение t_{II} , преобразуется к единицам напряжения и выдается на выход. Таким образом, каждый результат измерения, выполняемого с помощью $\Sigma\Delta$ АЦП, прямо пропорционален среднему значению входного напряжения за интервал времени длительностью t_{II} и в конце этого интервала выдается на выход АЦП с периодом $t_{II} = 1/f_{\text{выб}}$, где $f_{\text{выб}}$ - частота выполнения измерений (в описаниях $\Sigma\Delta$ АЦП эта частота называется частотой выборки).

Понятно, что усреднение на интервале времени приводит к уменьшению действия периодической помехи в статическом режиме измерения. Если время интегрирования (измерения) кратно периоду помехи $t_{ном}$, то есть если

$$t_{И} = k \cdot t_{ном} = \frac{k}{f_{ном}},$$

то помеха исключается полностью, поскольку интеграл от периодического сигнала за его период равен нулю.

Однако, в динамическом режиме, это усреднение приводит к появлению погрешности, поскольку в количество выходных импульсов вместо мгновенного значения преобразуется среднее значение на интервале времени $t_{И}$. Момент времени, к которому относится это значение, неизвестен.

По указанной причине при повышении скорости изменения входного напряжения погрешность преобразования возрастает. На практике для оценки этой погрешности используют частотные характеристики $\Sigma\Delta$ АЦП, полученные для синусоидальных сигналов измеряемой величины. Понятно, что из-за дискретности преобразования частотные характеристики будут периодическими. Однако высокая частота дискретизации (тактового генератора) так далеко раздвигает повторяющиеся частотные характеристики, что они не накладываются друг на друга. Вследствие этого их функциональное выражение частотной характеристики, ближайшей к нулевой частоте, такое же, как и для аналоговых преобразователей. Имея это в виду, приступим к выводу амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $\Sigma\Delta$ АЦП.

Частота f_T тактирующего генератора постоянна. Поэтому максимальное количество импульсов, которые могут попасть в счетчик при максимальном значении входного напряжения, равно $n = t_{И} \cdot f_T = t_{И} / \Delta t$, где $\Delta t = 1 / f_T$ - период тактовой частоты.. Таким образом, число n есть точное дискретное выражение длительности интервала интегрирования измеряемого напряжения, поскольку $t_{И} = n \cdot \Delta t$.

При уменьшении входного напряжения количество импульсов, попадающее в счетчик за время $t_{И}$, пропорционально уменьшается.

Из приведенного описания следует, что при каждом измерении счетчик импульсов работает в течение времени $t_{II} = n \cdot \Delta t$, то есть его вход открыт в течение n тактов, задаваемых тактовым генератором. В последующем нам будет удобнее оперировать с относительной частотой, приведенной к частоте тактового генератора. Естественно, что при таком действии приведенная частота тактового генератора $\bar{f}_T = 1$, и ее приведенный период $\Delta \bar{t} = 1$. В этих новых координатах импульсная переходная характеристика такого усреднения счетчика в аналоговой записи есть

$$\bar{k}(t) = \begin{cases} \frac{1}{n}, & 0 < t \leq t_{II}, \\ 0, & t \leq 0 \cup t > t_{II}. \end{cases}$$

Отображение этой импульсной переходной характеристики в частотную область получается путем дискретного преобразования Фурье (см. также аналоговый вариант такого преобразования в п. 3.4):

$$K(j\bar{\omega}) = \sum_{i=1}^n \bar{k}(t_i) \cdot e^{-j\bar{\omega}i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{-j\bar{\omega}i}, \quad (23)$$

где $\bar{\omega} = \frac{\omega}{f_T} = \frac{2\pi f}{f_T}$ - относительная частота, приведенная к частоте тактового генератора f_T .

Поскольку импульсная переходная характеристика нормирована, то есть $\sum_{i=1}^n k(t_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} = 1$, то и частотная характеристика при нулевой частоте также будет равна единице.

Левая часть (23) есть сумма членов геометрической прогрессии, а именно

$$K(j\bar{\omega}) = \frac{1}{n} \cdot \frac{1 - e^{-j\bar{\omega}n}}{1 - e^{-j\bar{\omega}}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{e^{-j\bar{\omega}n/2}}{e^{-j\bar{\omega}/2}} \cdot \frac{e^{j\bar{\omega}n/2} - e^{-j\bar{\omega}n/2}}{e^{j\bar{\omega}/2} - e^{-j\bar{\omega}/2}} = e^{-j\bar{\omega}(n-1)/2} \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin(\bar{\omega}n/2)}{\sin(\bar{\omega}/2)}.$$

Модуль последнего выражения есть нормированная (а потому и безразмерная) амплитудно-частотная характеристика $\Sigma\Delta$ АЦП первого порядка. Поскольку $\left| e^{-j\bar{\omega}(n-1)/2} \right| = 1$,

$$A(\bar{\omega}) = |K(j\bar{\omega})| = \left| \frac{\sin(\bar{\omega}n/2)}{n \cdot \sin(\bar{\omega}/2)} \right| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi n f}{f_T}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi f}{f_T}\right)} \right|. \quad (24)$$

Нормированная АЧХ $\Sigma\Delta$ АЦП k -го порядка имеет вид:

$$A_k(\bar{\omega}) = \left| \frac{\sin((k-1)\bar{\omega}n/2)}{n \cdot \sin(\bar{\omega}/2)} \right|^k = \left| \frac{\sin\left(\frac{(k-1)\pi n f}{f_T}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi f}{f_T}\right)} \right|^k. \quad (25)$$

В качестве примера приведем АЧХ $\Sigma\Delta$ -АЦП ADS1256 фирмы Texas Instruments. Этот $\Sigma\Delta$ -АЦП реализован, как АЦП пятого порядка, в котором предусмотрено программное усреднение результатов с преобразований на выходе.

Поскольку порядок $\Sigma\Delta$ -АЦП определяется порядком преобразователя напряжения в частоту, поэтому частота выходных импульсов будет в четыре раза меньше, чем f_T . а его амплитудно-частотная характеристика будет выглядеть, как пятая степень выражения, аналогичного (25):

$$A(f) = \left| \frac{\sin\left(\frac{4n\pi f}{f_T}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{4\pi f}{f_T}\right)} \right|^5,$$

где $f_T = 7.68 \text{ МГц}$.

В этом АЦП результат каждого преобразования получается путем усреднения частоты за время, равное 64 периодам частоты тактового генератора, то есть в этом случае $n = 64$. Количество s усредняемых результатов устанавливается программным путем и может изменяться от 1 до 12000.

В связи с этим окончательная амплитудно-частотная характеристика АЦП ADS 1256 имеет следующий вид:

$$A(f) = \left| \frac{\sin\left(\frac{256\pi f}{f_T}\right)}{64 \cdot \sin\left(\frac{4\pi f}{f_T}\right)} \right|^5 \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{256 \cdot s \pi f}{f_T}\right)}{s \cdot \sin\left(\frac{4\pi f}{f_T}\right)} \right|. \quad (26)$$

Как уже было сказано ранее, усреднение (то есть фильтрация), выходных данных, предпринятое в АЦП ADS1256/6, позволяет уменьшить влияние помех, но снижает быстродействие, а это приводит к увеличению погрешностей в динамическом режиме. Например, на частоте входного сигнала 1200 Гц с увеличением количества усреднений значения АЧХ существенно уменьшаются, а это значит, что уменьшается и максимальное значение (здесь именуемое амплитудой) выходного сигнала. При $s = 1$, то есть без программного усреднения АЦП выполняет 30000 преобразований в секунду. В этом режиме работы АЦП при частоте входного сигнала 1200 Гц его АЧХ равна $A(1200) = 0.9869$ вместо желательного значения 1.0 . Такое снижение значений АЧХ по сравнению с единицей приводит к отрицательной погрешности, равной $[A(1200) - 1.0] \cdot 100\% = -1.31\%$. При $s = 8$, то есть при последующем программном усреднении и снижении быстродействия АЦП до 3750 измерений в секунду $A(1200) = 0.8310$. В этом случае на частоте 1200 Гц погрешность возрастает по модулю, оставаясь отрицательной, до $[A(1200) - 1.0] \cdot 100\% = -16,9\%$. Кроме того, из-за усреднения возникает групповая задержка результатов по времени, и, как следствие, появляется погрешность датирования отсчетов.

Указанные погрешности могут быть существенно уменьшены посредством включения перед $\Sigma\Delta$ АЦП корректирующих звеньев, АЧХ которых в идеале должна быть обратна АЧХ АЦП. Задача подобной коррекции частотных характеристик относится к классу обратных задач математической физики, поскольку ее фактической целью является восстановление формы изменения входной величины по известной выходной. Строго доказано, что не существует физически реализуемого динамического звена, имеющего АЧХ, взаимно обратную АЧХ применяемого средства измерений. Можно искать только приближенное решение этой задачи. Но для этого необходимо аппроксимировать в ограниченном частотном диапазоне комплексную частотную характеристику (КЧХ) $K(j\bar{\omega})$ или $K(j\bar{f})$ применяемого средства измерений таким выражением, чтобы обратное ему выражение оказалось физически реализуемым.

Приведем два примера дробно-рациональной аппроксимации комплексной частотной характеристики АЦП ADS1256 в диапазоне частот $f \in [0, 7200]$ Гц без

усреднения выходных данных ($s = 1$, $f_{изм} = 30000$ изм/с) и в диапазоне частот $f \in [0, 1800]$ Гц с усреднением ($s = 8$, $f_{изм} = 3750$ изм/с).

$$\text{Для } s = 1: \quad K_1(j\bar{f}) = \frac{1}{1 + 2 \cdot 0.8753 \cdot 3.811(j\bar{f}) - (3.811\bar{f})^2}, \quad (27)$$

$$\text{фазочастотная характеристика } \varphi_1(j\bar{f}) = -\arctg \frac{6.6714\bar{f}}{1 - 14.524\bar{f}^2}.$$

$$\text{Для } s = 8: \quad K_8(j\bar{f}) = \frac{1}{1 + 2 \cdot 0.8598 \cdot 14.73(j\bar{f}) - (14.73 \cdot \bar{f})^2}, \quad (28)$$

$$\varphi_3(j\bar{f}) = -\arctg \frac{25.329 \cdot \bar{f}}{1 - 216.97\bar{f}^2}$$

Аргументом этих характеристик является приведенная частота

$$\bar{f} = \frac{f}{f_{выб1}} = \frac{f}{30000}.$$

В таблицах 1 и 2 соответственно приведены значения исходных частотных характеристик АЧХ исх, рассчитанных по (7), и аппроксимирующих АЧХ аппр. Масштаб частоты на рисунках и в таблицах – реальный.

Таблица 1

f Гц	0.0	1200	2400	3600	4800	6000	7200
АЧХ исх	1.0	0.9869	0.9486	0.8878	0.8087	0.7165	0.6169
АЧХ аппр	1.0	0.9876	0.9502	0.8886	0.8073	0.7150	0.6213

Таблица 2

f Гц	0.0	300	600	900	1200	1500	1800
АЧХ исх	10.0	0.9888	0.9559	0.9025	0.8310	0.7444	0.6463
АЧХ аппр	1.0	0.9895	0.9575	0.9035	0.8296	0.7426	0.6512

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Дробно-рациональная аппроксимация АЧХ АЦП ADS1256 в указанных диапазонах частот с помощью АЧХ второго порядка выполняется с высокой степенью точности, погрешность аппроксимации на краю частотного диапазона не

превышает 1 %. Это обстоятельство позволяет заключить, что аппроксимирующие характеристики позволяют адекватно описать поведение реального АЦП в указанных диапазонах частот

2. Коэффициенты демпфирования, полученные в результате аппроксимации обеих АЧХ и равные 0.8753 и 0.8598 соответственно, достаточно близки к единице, что свидетельствует о значительной «успокоенности» аппроксимированных АЧХ.

3. К сожалению, знаменатели соответствующих КЧХ не могут быть разложены на биномы. Однако следует ожидать, что из-за близости к единице коэффициентов демпфирования знаменатели этих КЧХ с достаточной степенью точности могут быть представлены, как полные квадраты биномов.

Пользуясь выводом 3, можно попытаться синтезировать двухкомпонентный обратный фильтр, состоящий из двух устойчивых звеньев перво-

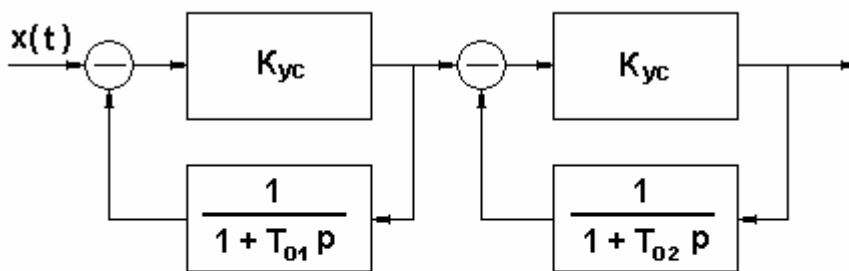


Рис. 19. Структурная схема двухкомпонентного корректирующего звена

го порядка с одинаковыми параметрами. Схема этого двухкомпонентного фильтра представлена на рисунке 19. Понятно, что такой аналоговый обратный фильтр может быть включен последовательно с $\Sigma\Delta$ АЦП только перед ним, на его входе. На выходе АЦП этот фильтр может быть реализован только программным путем, в виде цифрового аналога. Однако цифровая реализация фильтра приведет к увеличению времени задержки результата, то есть к увеличению погрешности датирования отсчетов.

Каждый из компонентов этого звена представляет собой усилитель с коэффициентом усиления K_{yc} , охваченный отрицательной обратной связью через апериодическое динамическое звено первого порядка. Максимальный сдвиг фа-

зы, реализуемый этим звеном, равен 90° , поэтому каждый компонент заведомо устойчив. КЧХ такого компонента будет физически реализуемой и имеет вид:

$$K(j\bar{f}) = K_{yc} \frac{1 + T_{oi}j\bar{f}}{K_{yc} + (1 + T_{oi}j\bar{f})} = \frac{1 + T_{oi}j\bar{f}}{1 + (1 + T_{oi}j\bar{f})/K_{yc}}, i = 1, 2.$$

Обратная связь в данном случае не приведет к потере устойчивости такого компонента, а с увеличением коэффициента усиления K_{yc} КЧХ такого компонента будет стремиться к обратной КЧХ инерционного звена первого порядка и тем самым компенсировать ее убыль на высоких частотах.

Простейшим случаем коррекции с помощью одного такого компонента является коррекция динамических характеристик датчиков температуры, которые являются динамическими звеньями первого порядка. Для коррекции погрешностей в динамическом режиме $\Sigma\Delta$ АЦП ADS1256 потребуются оба компонента. Понятно, что, вследствие некорректности обратной задачи полной коррекции добиться не удастся. Поэтому в реальной ситуации, когда действуют помехи и наводки, и в зависимости от скорости изменения входного напряжения и требуемой точности измерений коэффициент усиления K_{yc} придется настраивать путем подбора.

Поскольку коэффициенты затухания аппроксимирующих КЧХ достаточно близки к единице, и знаменатель обеих КЧХ может быть приближенно представлен, как полный квадрат, то есть в виде произведения одинаковых биномов, параметры этих компонентов выберем одинаковыми для каждого из двух примеров.

Качество коррекции динамических погрешностей $\Sigma\Delta$ АЦП с помощью двухкомпонентного обратного фильтра, представленного на рисунке 3, оценивалось на модельных примерах. Предварительные эксперименты показали, что для обоих случаев достаточно выбрать одинаковые коэффициенты усиления в частотном диапазоне (200 ÷ 1200) Гц. Отличаться будут только постоянные времени.

В самом деле, из (27), (28) следует, что для коррекции АЦП с частотой выборки 30000 1/с ($s = 1$) значение постоянной времени для обратного фильтра следует выбрать около 3 относительных единиц, а для коррекции АЦП с частотой выборки 3750 1/с ($s = 8$) – около 11 относительных единиц.

При подгонке обратных фильтров удовлетворительные результаты были получены при следующих значениях параметров:

- для $s = 1$, $f_{\text{выб}} = 30000$ 1/с $K_{yc} = 500$, $T = 2,95$ отн. ед.,
- для $s = 8$, $f_{\text{выб}} = 3750$ 1/с $K_{yc} = 500$, $T = 11.1$ отн. ед.

Результаты подгонки обратных фильтров приведены в таблицах 3, 4 соответственно, где приведены значения исходных АЧХ и АЧХ последовательного соединения обратного фильтра и АЦП.

Таблица 3

f Гц	0.0	1200	2400	3600	4800	6000	7200
АЧХ исх	1.0	0.9869	0.9486	0.8878	0.8087	0.7165	0.6169
АЧХ ф	1.0	1.0007	1.0015	0.9991	0.9889	0.9659	0.9269

Таблица 4

f Гц	0.0	300	600	900	1200	1500	1800
АЧХ исх	1.0	0.9888	0.9559	0.9025	0.8310	0.7444	0.6463
АЧХ ф	1.0	1.0010	1.0030	1.0026	0.9949	0.9738	0.9330

Для того, чтобы представить эффект, вносимый обратным фильтром в расширенном диапазоне частот, в таблице 5 приводятся значения исходной АЧХ и аппроксимирующей АЧХ при $s = 1$ в диапазоне частот ($0 \div 18000$) Гц.

Таблица 5

f Гц	0.0	3000	6000	9000	12000	15000	18000
АЧХ исх	1.0	0.9208	0.7165	0.4661	0.2484	0.1046	0.0327
АЧХ ф	1.0	1.0009	0.9659	0.8312	0.5942	0.3322	0.1352

Из таблиц 3, 4 виден значительный эффект, который приносит обратный фильтр. На граничных или близких к граничным частотам диапазона погрешность оказывается существенно меньше, чем у АЦП без обратного фильтра: вместо 30 % достигнута погрешность порядка ($4 \div 5$) %. Таблица 5 показывает также, что обратный фильтр, по сути дела, приводит к более, чем двукратному увеличению частоты среза. Кроме того в силу взаимнооднозначной зависимости

между АЧХ и фазовой частотной характеристиками мы имеет право предположить, что в диапазоне, в котором АЧХф примерно постоянна, зависимость сдвига фазы от частоты ненамного отличается от линейной. Линейность фазовой частотной характеристики, в свою очередь, свидетельствует о том, что при аналого-цифровом преобразовании все выходные данные подвержены одинаковому групповому запаздыванию относительно изменения входного напряжения. Это запаздывание компенсируется простым сдвигом выходных данных на время группового запаздывания. Есть основания полагать, что это запаздывание будет не слишком велико.

В заключение отметим, что описанный метод аппаратной коррекции погрешностей измерений или преобразований в динамическом режиме может быть применен не только со всеми видами $\Sigma\Delta$ АЦП, но и с другими средствами измерений. Различия могут возникать из-за невозможности дробно-рациональной аппроксимации КЧХ или АЧХ, а также вследствие изменений ширины частотного диапазона.

4. Метрологические характеристики средств измерений, подлежащие нормированию

4.1. Общие положения

Анализ метрологических структурных схем, выполненный выше в п.п. 3.2 - 3.5, свидетельствует о том, что инструментальная погрешность результатов измерений целиком определяется свойствами средств измерений. Характеристики этих свойств называются *метрологическими характеристиками* средств измерений.

В стандарте ГОСТ 8.009-84 “Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений” приводится определение метрологических характеристик и их перечень, общий подход к выбору номенклатуры метрологических характеристик, а также способы установления норм на них и примеры применения.

В технической документации на средства измерений следует приводить перечень метрологических характеристик и нормы на них, исходя из того, что метрологические характеристики должны позволять

- прогнозировать характеристики погрешности результатов измерений - при приобретении средства измерений или при планировании измерений,
- оценивать характеристики погрешности результатов измерений - при выполнении измерений в реальных условиях эксплуатации,
- контролировать сохранность метрологических характеристик средств измерений при их испытаниях с приемлемыми затратами без потери достоверности контроля.

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 8.009-84 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 8.009-84 при технической необходимости могут устанавливаться дополнительно сверх указанных в этом стандарте.

4.2. Характеристики погрешности средств измерений

Понятия, термины и определения, приведенные в этом и следующих пунктах, соответствуют ГОСТ 8.009-84 и МИ 2247-93 “Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения”.

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 отдельно:

- 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 Δ_H и верхней Δ_B границами, между которыми содержатся значения основной погрешности с вероятностью, не меньшей заданной вероятности P_0 , равной обычно $0,8 \div 0,95$, то есть

$$P(\Delta_H \leq \varepsilon \leq \Delta_B) \geq P_0.$$

Как правило, эти границы симметричны относительно нуля, то есть $\Delta_H = -\Delta_B = -\Delta_X$.

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 от норм на соответствующие характеристики основной погрешности по каждой из влияющих величин отдельно.

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.

Таковыми 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).*

4.3. Характеристики преобразования измеряемой величины и сигналов измерительной информации

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 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 могут служить *импульсная переходная характеристика (весовая функция) $k(t)$* , и *комплексная частотная характеристика $K(j\omega)$* . Эти характеристики называются *полными динамическими характеристиками*. Они взаимнооднозначно связаны преобразованием Фурье:

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

К полным динамическим характеристикам относятся также

- *передаточная функция*, которая получается из $K(j\omega)$ простой заменой $j\omega = p$,

- *амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$* в комплекте с *фазо-частотной характеристикой $\varphi(\omega)$* ,

- *переходная характеристика $H(t)$* .

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.

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

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

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 выходного синусоидального сигнала по отношению к фазе вызвавшего его синусоидального входного сигнала.

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

Комплексная частотная характеристика реального средства измерений представляет собой отношение двух полиномов от $j\omega$, причем степень полинома числителя не превосходит степени полинома знаменателя.

На рис. 19 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, амплитудно-частотная характеристика может иметь максимум, а ее фазо-частотная характеристика с увеличением частоты стремится к $(-\pi/2)$. Фазочастотные характеристики 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_p средства измерений (см. рис. 20) и граничные значения частот,

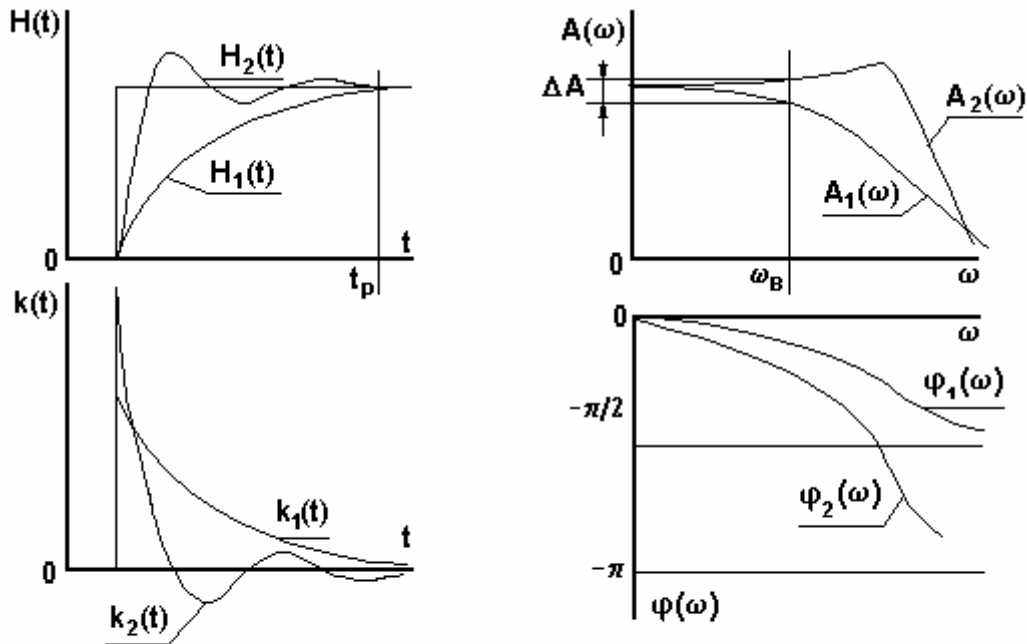


Рис. 20. Полные и частные динамические характеристики

между которыми амплитудно-частотная характеристика отклоняется от своего номинального значения не более, чем на заданную величину. На рис. 20 показана лишь верхняя частота ω_B 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).

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.

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.

4.4. 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,

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

- 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.

4.5. 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 отдельно.

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. Абсолютная погрешность Δ приводится к некоторому условному нормирующему значению измеряемой величины $x_{нрм}$, и для нее во всем диапазоне изменения измеряемой величины устанавливается предел допускаемых значений

$$\left| \frac{\Delta}{x_{нрм}} \right| \cdot 100\% \leq \gamma \cdot \rho_{\Delta} \%,$$

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

$$|\Delta| \leq \frac{\gamma \cdot \rho \Delta \%}{100} \cdot |x_{\text{пр}}|$$

В зависимости от типа прибора, диапазона значений измеряемых величин, от принципа действия и от состава погрешностей нормирующие значения могут быть выбраны из числа следующих:

$$x_{\text{нрм}} = |x_{\text{max}}| \text{ (модуль максимального значения в диапазоне измерения),}$$

$$x_{\text{нрм}} = |x| \text{ (модуль текущего значения измеряемой величины),}$$

$$x_{\text{нрм}} = |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}| \text{ (ширина диапазона значений измеряемой величины),}$$

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 “Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования” 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 $n = 1, 0, -1, -2, \dots$. Значения, указанные в скобках, не рекомендованы и используются в порядке исключения. Обозначение класса точности прибора обычно изображается на шкале или лицевой панели прибора различным образом в зависимости от принятого для приборов данного типа нормирующего значения:

1.5 - обозначение класса точности прибора при $x_{\text{нрм}} = |x_{\text{max}}|$ (нормируется при превалирующем перевесе аддитивной погрешности над мультипликативной),

1.5 - обозначение класса точности прибора при $x_{\text{нрм}} = |x|$ (нормируется при малости аддитивной погрешности по сравнению с мультипликативной),

|1.5| - обозначение класса точности прибора при $x_{нрм} = |x_{max} - x_{min}|$ (нормируется, когда нулевое значение измеряемой величины находится либо внутри диапазона, либо вне его).

1.5 - обозначение класса точности прибора (как правило, аналогового омметра), численно равное выраженному в %% отношению максимального в диапазоне измерения значения погрешности в миллиметрах длины шкалы к длине всей шкалы в миллиметрах.

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.

4.6. 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. Индикация результата выполняется в цифровом виде. Обычно цифровые приборы имеют возможность обмена информацией с компьютером и тогда результат измерения передается в память компьютера также в цифровом виде. В связи с этим неизбежно округление результатов. Абсолютная погрешность, возникающая от округления, является аддитивной и не превышает цены единицы младшего разряда выходного кода или цифрового табло прибора.

В большинстве случаев при нормировании характеристик погрешности цифровых приборов учитываются обе составляющие погрешности: мультипликативная и аддитивная. Поэтому для 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 инструменталь-

ной погрешности (13). Коэффициенты двучленной формулы выражаются в процентах.

С целью получения выражения для относительной погрешности разделим обе части равенства (13) на $|x|$:

$$\begin{aligned} \gamma_{инст} &= \frac{\Delta K}{K} 100\% + \frac{\Delta \varepsilon}{|x|} 100\% = \frac{\Delta K}{K} 100\% + \frac{\Delta \varepsilon}{|x_{max}|} 100\% + \frac{\Delta \varepsilon}{|x|} 100\% - \frac{\Delta \varepsilon}{|x_{max}|} 100\% \\ &= \\ &= \left(\frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta \varepsilon}{|x_{max}|} \right) \cdot 100\% + \frac{\Delta \varepsilon}{|x_{max}|} \left(\frac{|x_{max}|}{|x|} - 1 \right) \cdot 100\%. \end{aligned}$$

Таким образом, если будут установлены такие значения $c > 0$ и $d > 0$, что

$$\left(\left| \frac{\Delta K}{K} \right| + \left| \frac{\Delta \varepsilon}{x_{max}} \right| \right) \cdot 100\% \leq c, \quad \left| \frac{\Delta \varepsilon}{x_{max}} \right| \cdot 100\% \leq d, \quad (29)$$

то пределы допускаемой основной относительной погрешности могут быть нормированы в соответствии с ГОСТ 8.401 *двучленной формулой*:

$$|\gamma_{инст}| \leq \left[c + d \left(\left| \frac{x_{max}}{x} \right| - 1 \right) \right] \%, \quad (30)$$

в которой значения коэффициентов c и d выбираются из ряда чисел, приведенного в предыдущем пункте.

Обратимся снова к абсолютной инструментальной погрешности:

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

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. 13 и 21. 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 .

Метрологические характеристики, нормируемые для цифровых приборов:

- диапазон измерения,
- пределы допускаемой основной относительной погрешности, нормируются двучленной формулой (30) путем задания коэффициентов c и d ,
- входное сопротивление (импеданс), нормируется только для электроизмерительных приборов,
- количество разрядов, представляемых на индикацию,

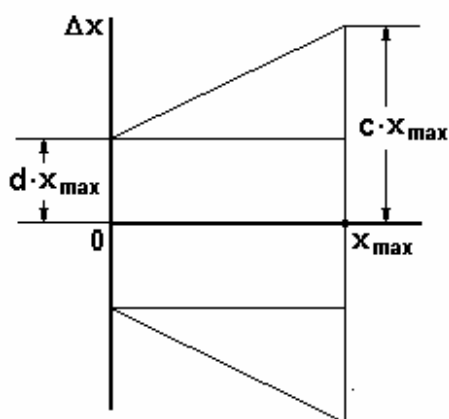


Рис. 21. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности линейных средств измерений

- 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 $1/c$) или длительность

цикла одного преобразования (представляется в c),

- 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 обозначается двумя цифрами, равными коэффициентам двучленной формулы, разделенными косой чертой: c/d (см. также п. 3.3).

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 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 информацией 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.

4.7. Метрологические характеристики аналоговых измерительных преобразователей

1*. Для линейных аналоговых измерительных преобразователей нормируются следующие метрологические характеристики (см. метрологическую структурную схему рис. 10):

- 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 (формула (30) п.4.6) посредством указания значений коэффициентов c и d ; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется отдельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих,

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

- одна из полных динамических характеристик, 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 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 (см. также метрологическую структурную схему рис.4).

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.

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

4.8. 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 (формула (30) в п. 4.6) 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 напряжения (тока) - предел допускаемой основной приведенной погрешности,
- входное сопротивление (импеданс),
- вид выходного кода и количество разрядов,
- цена единицы младшего разряда выходного кода,
- пределы допускаемой дополнительной погрешности,
- максимальная частота измерений (представляется в $1/c$) или длительность цикла одного преобразования (представляется в c), указываются с учетом быстрогодействия устройств связи с компьютером и дисциплины организации этой связи,
- погрешность датирования отсчетов, указывается с учетом быстрогодействия устройств связи с компьютером и дисциплины организации этой связи,

Для АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного напряжения (тока), указывается номинальная функция преобразования.

В соответствии с ГОСТ 8.401 класс точности линейного АЦП обозначается двумя цифрами, равными коэффициентам двучленной формулы, 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,

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

- пределы допускаемой основной относительной погрешности, нормируются двучленной формулой (формула (30) в п. 4.6) путем задания коэффициентов c и d ; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется отдельное 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 отдельно,

- 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.

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

4.9. 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 отдельно,
 - 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 (формула (30) в п.4.6) 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.

4.10. 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 "Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования". 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*).

Абсолютные и относительные погрешности могут служить характеристиками качества результатов измерений и средств измерений. Приведенные погрешности являются характеристикой только инструментальной погрешности средств измерений.

Приведенные погрешности вычисляются, как отношение абсолютной инструментальной погрешности средства измерений, определяемой формулами (7),

(11), (13), к нормирующему значению измеряемой величины (*fiducial value of a measurand*) и выражаются, как правило, в процентах:

$$\gamma_{СИ} = \frac{\Delta_{инст}}{x_{нрм}} \cdot 100\%.$$

В зависимости от особенностей средства измерений и характера зависимости абсолютной погрешности от измеряемой величины в качестве нормирующего значения $x_{нрм}$ могут использоваться следующие значения:

- $x_{нрм} = |x|_{max}$ - максимальное абсолютное значение измеряемой величины из диапазона измерения, выбирается, когда основной вклад в инструментальную погрешность вносит аддитивная составляющая,

- $x_{нрм} = |x|$ - модуль текущего значения измеряемой величины или результат измерения, выбирается, когда основной вклад в инструментальную погрешность вносит мультипликативная составляющая,

- $x_{нрм} = |x_{max} - x_{min}|$ - ширина диапазона измерения, выбирается, когда нуль шкалы находится внутри или вне диапазона измерения.

Только для аналоговых омметров, на шкале которых имеются отметки границ диапазона измерения: '0' и '∞', применяется особое выражение для приведенной погрешности, в котором абсолютная погрешность и нормирующее значение измеряемой величины выражаются в единицах длины шкалы: $\Delta l [мм] = k \cdot \Delta_{инст}$, $L [мм]$ и

$$\gamma_{прив} = \frac{\Delta l}{L} \cdot 100\%.$$

Приведенные погрешности применяются при назначении и установлении норм (пределов допускаемых значений) на инструментальные погрешности средств измерений, как правило, для нормальных условий эксплуатации. Установленный предел допускаемой основной приведенной погрешности, выраженный в процентах от нормирующего значения измеряемой величины, используется в качестве условного обозначения *класса точности (class index, accuracy 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 пред-

ставлен двучленной формулой с коэффициентами c и d , то для обозначения класса точности используется дробь c/d (см. также п. 3.3).

5. Метрологический анализ последовательного соединения измерительных преобразователей

5.1. Линейные измерительные преобразователи

Метрологическая модель последовательности аналогового преобразования измерительной информации строится с учетом современной модульной технологии создания измерительных информационных систем (ИИС) и измерительных подсистем АСУ ТП. 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 измерительный преобразователь, метрологические характеристики которого должны быть определены расчетным путем по метрологическим характеристикам компонентов.

В настоящем разделе рассмотрен 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 виде, показанном на рис. 22 а), где через **ИП 1** и **ИП 2** обозначены унифицированные метрологические модели двух преобразователей, соединенных последовательно.

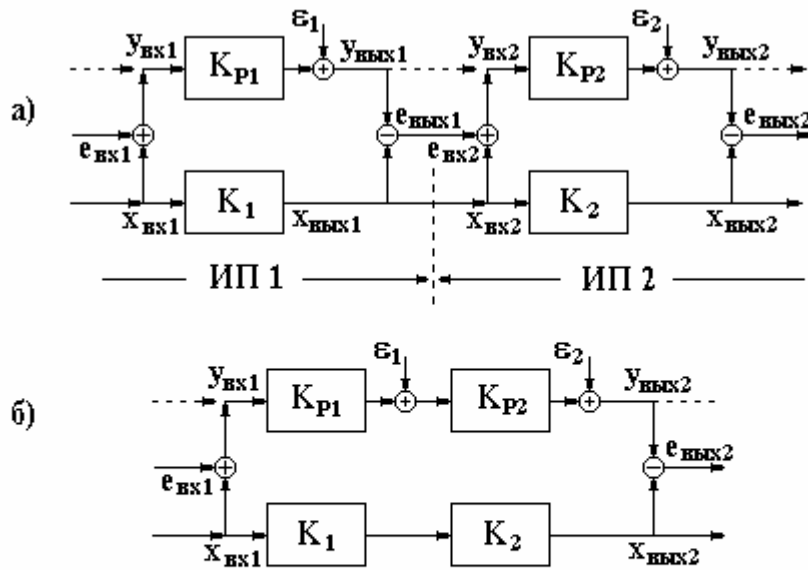


Рис. 22. Метрологическая модель последовательного соединения двух измерительных преобразователей

Здесь K_{p1}, K_{p2}, 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:

$$\begin{aligned} y_{вых1} &= K_{p1} \cdot (x_{вх1} + e_{вх1}) + \varepsilon_1 \\ x_{вых1} &= K_1 \cdot x_{вх1} \\ e_{вых1} &= K_{p1} \cdot (x_{вх1} + e_{вх1}) - K_1 \cdot x_{вх1} + \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (31)$$

Аналогично для второго преобразователя

$$\begin{aligned} y_{вых2} &= K_{p2} \cdot (x_{вх2} + e_{вх2}) + \varepsilon_2 \\ x_{вых2} &= K_2 \cdot x_{вх2} \\ e_{вых2} &= K_{p2} \cdot (x_{вх2} + e_{вх2}) - K_2 \cdot x_{вх2} + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (32)$$

Очевидно, что $x_{вх2} = x_{вых1}$, $y_{вх2} = y_{вых1}$, $e_{вх2} = e_{вых1}$. Учитывая эти равенства, подставим (31) в (32) и для абсолютной погрешности на выходе второго компонента получим:

$$\begin{aligned}
e_{\text{вых}2} &= K_{p2}(K_1x_{\text{ex}1} + K_{p1}(x_{\text{ex}1} + e_{\text{ex}1}) - K_1x_{\text{ex}1} + \varepsilon_1) - K_1K_2x_{\text{ex}1} + \varepsilon_2 = \\
&= (K_{p1}K_{p2} - K_1K_2) \cdot x_{\text{ex}1} + K_{p2}\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + K_{p1}K_{p2}e_{\text{ex}1}.
\end{aligned}$$

В результате нами получено выражение, которое легко может быть представлено в унифицированном виде для метрологической модели композиционного преобразователя, показанного на рис. 22 б). Сделаем следующие подстановки:

$$K_p = K_{p1} \cdot K_{p2}, \quad K = K_1 \cdot K_2, \quad \varepsilon = K_{p2} \cdot \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

И разделим абсолютную погрешность на значение идеального выходного сигнала $x_{\text{вых}2} = K_1K_2x_{\text{ex}1}$. Тогда приведенная к выходу относительная погрешность преобразования измерительной информации, выполняемого композиционным преобразователем, выражается следующей формулой:

$$\gamma_{\text{вых}} = \frac{e_{\text{вых}}}{K_1K_2 \cdot x_{\text{ex}1}} = \left(\frac{\Delta K_1}{K_1} + \frac{\Delta K_2}{K_2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_1}{K_1 \cdot x_{\text{ex}1}} + \frac{\varepsilon_2}{K_1 \cdot K_2 \cdot x_{\text{ex}1}} \right) + \frac{e_{\text{ex}1}}{x_{\text{ex}1}}.$$

Первые два слагаемые, взятые в скобки, представляют собой инструментальную составляющую погрешности преобразования, которая равна сумме инструментальных составляющих погрешностей преобразования каждым из преобразователей. Забегая несколько вперед и принимая во внимание нормирование собственных относительных погрешностей преобразователей двучленными формулами, можем записать двучленную формулу по типу формулы (30) для погрешности композиционного преобразователя через коэффициенты c_1, d_1, c_2, d_2 двучленных формул, нормирующих характеристики погрешности каждого из преобразователей:

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

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

5.2. Модель взаимного влияния измерительных преобразователей при их физическом соединении

Расчеты, приведенные выше в п. 5.1, 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 п. 5.1 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.

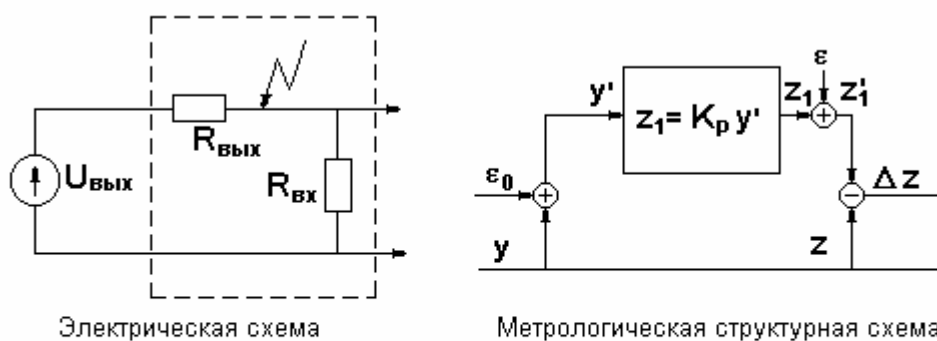


Рис. 23. Фиктивный соединительный компонент измерительного канала

Структурная схема фиктивного соединительного компонента, моделирующего указанный эффект при передаче сигнала напряжением, приведена на рис. 23. Этот компонент имеет линейную характеристику, номинальный коэффициент преобразования K равен 1, реальный коэффициент преобразования равен

$$K_p = \frac{R_{ex}}{R_{ex} + R_{вых}}$$

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

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

то коэффициенты двучленной формулы

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

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 п. 5.1 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.

5.3. Последовательное соединение нелинейного датчика с линейризатором

Рассматривается составной измерительный канал, в котором вслед за нелинейным датчиком включен аппаратный линейризатор нелинейной функции преобразования датчика. Такая ситуация возникает тогда, когда измерительные каналы системы создаются из готовых измерительных преобразователей, в том числе, датчиков, которые выпускаются, быть может, различными производителями и имеют нормированные метрологические характеристики. Поскольку и датчик, и линейризатор суть нелинейные средства измерений, для них, как показано в п. 3.2 и на рис. 11, характеристики погрешности могут нормироваться лишь пределами допускаемой основной приведенной погрешности. Иными словами, погрешности таких средств измерений вынужденно рассматриваются, как аддитивные погрешности. При этом, если инструментальные погрешности аппаратных аналоговых линейризаторов нормируются приведенными к выходу, то погрешности нелинейных датчиков могут быть нормированы как приведенными

ко входу, так и к выходу. Наша задача состоит в том, чтобы получить расчетные формулы для вычисления характеристик погрешности такого соединения по нормированным характеристикам погрешности датчика и линейризатора.

Метрологическая структурная схема описанного соединения датчика и линейризатора представлена на рис. 24. Подобного рода измерительные

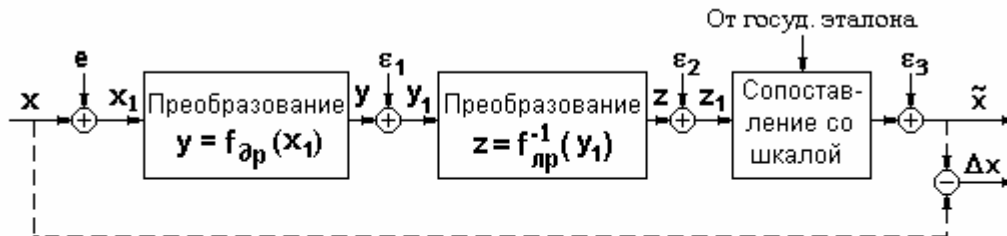


Рис. 24. Упрощенная метрологическая модель измерительного канала с нелинейным датчиком и линейризатором

каналы применяются, например, для измерения температуры (термопара или термометр сопротивления – нелинейны, включается линейризатор) или расход (нелинейное преобразование расхода в давление, затем включается блок извлечения корня).

На рисунке 24 обозначено:

x - истинное значение измеряемой величины,

e - погрешность применения,

$y = f_{др}(x)$ - реальная функция преобразования конкретного экземпляра датчика,

$x = f_{лр}^{-1}(y)$ - реальная функция преобразования линейризатора,

ε_1 - собственная аддитивная погрешность преобразования датчика,

ε_2 - аддитивная погрешность линейризатора,

ε_3 - погрешность воспроизведения шкалы и погрешность сопоставления со шкалой, в том числе погрешность округления, выполняемого оператором при отсчете показаний аналогового прибора, или вызванного конечной разрядностью цифрового прибора или аналого-цифрового преобразования,

\tilde{x} - результат прямого измерения величины x , Δx - абсолютная погрешность результата измерения, $\Delta x = \tilde{x} - x$.

Номинальные функции преобразования:

$y = f_D(x)$ - номинальная функция преобразования, декларированная для датчиков данного типа,

$x = f_D^{-1}(y)$ - номинальная функция преобразования линейризатора, обратная номинальной функции датчика.

Понятно, что представленное соединение есть линейное средство измерений с единичным коэффициентом преобразования. Тем не менее расчетным путем может быть определено лишь предельное значение приведенной погрешности, которая считается аддитивной. Метрологическая структурная схема такого соединения отличается от структурной схемы рис. 10 тем, что линейризатор в структурной схеме рис. 10 считается гораздо более точным, чем первый элемент этой схемы, и его погрешностью можно пренебречь.

Если $y = f_D(x)$ - функция преобразования датчика, то аппаратный линейризатор должен иметь функцию преобразования, обратную функции преобразования датчика, то есть $x = f_D^{-1}(y)$. Но в силу неизбежных погрешностей реальная функция преобразования датчика $f_{DP}(y)$ отличается от желаемой.

Точно так же реальная функция преобразования линейризатора $f_{LP}^{-1}(y)$ в той или иной степени отличается от желаемой функции $f_D^{-1}(x)$. Примеры разброса функций преобразования и предельно допускаемых границ этого разброса приведены на рис. 25.

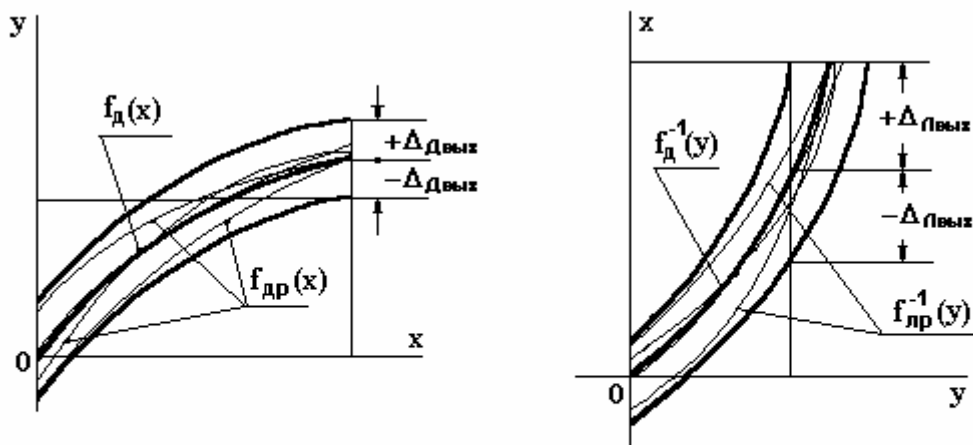


Рис. 25. Примеры разброса функций преобразования датчика и линейризатора

Если задана норма на абсолютную инструментальную погрешность нелинейного датчика, приведенную к выходу $\Delta_{Двых}$, то это значит, что

$$|f_{ДР}(x) - f_{Д}(x) + \varepsilon_1| = |\Delta f_{Д}(x) + \varepsilon_1| \leq \Delta_{Двых}.$$

Нормирование абсолютной погрешности датчика, приведенной к его входу $\Delta_{Двх}$, то есть к измеряемой величине, означает, что (см. также выражение (4) п. 3.2)

$$\frac{1}{f'_Д(x)} |f_{ДР}(x) - f_{Д}(x) + \varepsilon_1| = \frac{1}{f'_Д(x)} |\Delta f_{Д}(x) + \varepsilon_1| \leq \Delta_{Двх}, \quad (33)$$

где $\Delta f_{Д}(x) = f_{ДР}(x) - f_{Д}(x)$ - отличие реальной функции преобразования датчика от номинальной.

Обозначим норму на абсолютную погрешность линейризатора, приведенную к выходу, через $\Delta_{Лвых}$. Тогда

$$|f_{ЛР}^{-1}(y) - f_{Д}^{-1}(y) + \varepsilon_2| \leq \Delta_{Лвых}. \quad (34)$$

Из рис. 25 видно, что

$$|f_{ЛР}^{-1}(y) - f_{Д}^{-1}(y)| \cong \frac{1}{f'_Д(x)} |f_{ЛР}(x) - f_{Д}(x)|.$$

Поэтому неравенство (33) для допускаемой погрешности линаризатора с достаточной для данного случая точностью может быть переписано в виде:

$$\left| \frac{1}{f'_D(x)} (f_{LP}(x) - f_D(x)) + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_{\text{Лвых}}. \quad (35)$$

Естественными требованиями, предъявляемыми к функциям преобразования нелинейных средств измерений, являются требования монотонности (а, следовательно, взаимной однозначности преобразования), гладкости, то есть ограниченности модуля производных, отличие от нуля производной функции преобразования по входной величине.

Поскольку производная от функции преобразования есть чувствительность преобразователя:

$$df_P(x) / dx \cong df(x) / dx = S,$$

то эта производная, то есть чувствительность, не равна нулю нигде в диапазоне измерения и в этой же области ограничена. Более того, разработчики и изготовители средств измерений стремятся сделать чувствительность датчиков наибольшей. Это дает нам право делить на эти производные, не опасаясь их равенства нулю или бесконечности.

Пользуясь схемой рис. 24, запишем выражение для абсолютной погрешности результата прямого измерения, выполняемого с участием датчика и согласованного с ним линейризатора:

$$\Delta x = f_{LP}^{-1}(f_{DP}(x + e) + \varepsilon_1) + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - x$$

и перегруппируем слагаемые:

$$f_{LP}^{-1}(f_{DP}(x + e) + \varepsilon_1) = \Delta x + x - \varepsilon_2 - \varepsilon_3.$$

В силу монотонности функции $f_{LP}^{-1}(y)$ это выражение равносильно следующему:

$$f_{DP}(x + e) + \varepsilon_1 = f_{LP}(x + \Delta x - \varepsilon_2 - \varepsilon_3).$$

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:

$$f'_{LP}(x) \cdot \Delta x = f_{DP}(x) - f_{LP}(x) + f'_{DP}(x) \cdot e + f'_{LP}(x) \cdot (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + \varepsilon_1.$$

Далее будем действовать по аналогии с п. 3.2. Ввиду близости производных, показанной в (2), заменим все производные на $f'_D(x)$. Кроме того в правой части этого равенства прибавим и вычтем $f_D(x)$ и заметим, что производная $f'_D(x)$, то есть чувствительность датчика не должна быть равна нулю во всем диапазоне измерений, поэтому мы имеем право разделить обе части последнего равенства на $f'_D(x)$. В результате этих действий получим выражение для абсолютной погрешности результатов измерений:

$$\Delta x = \frac{1}{f'_D(x)} [f_{ДР}(x) - f_D(x) + \varepsilon_1] + \frac{1}{f'_D(x)} [f_D(x) - f_{ЛР}(x) + f'_D(x) \cdot \varepsilon_2] + \varepsilon_3 + e. \quad (36)$$

Первые три слагаемые имеют одинаковую размерность измеряемой величины и представляют собой абсолютную инструментальную погрешность рассмотренного соединения.

Первое слагаемое – это приведенная ко входу абсолютная погрешность датчика, нормой для которой является $\Delta_{Двх}$ (33).

Второе слагаемое – приведенная к выходу абсолютная погрешность линеаризатора, нормой для которой является $\Delta_{Лвых}$ (34).

Третье слагаемое – погрешность сопоставления результата со шкалой.

Последнее слагаемое - погрешность e . Это слагаемое составляет различие между погрешностями средства измерений и погрешностями результата измерений, и за него несут ответственность пользователи средства измерений.

Из выражения (36) следует, что для нормирования или расчета абсолютной инструментальной погрешности измерительного канала рассмотренного типа следует использовать сумму следующих характеристик погрешности:

норму (33) для абсолютной погрешности датчика, выраженную в единицах входной (измеряемой) величины $\Delta_{Двх}$,

норму (34) для абсолютной погрешности линеаризатора, выраженную в единицах выходной (измеряемой) величины $\Delta_{Лвых}$,

и норму Δ_{ε} , установленную для аддитивной погрешности операции сравнения сигнала измерительной информации z_I со шкалой измеряемой величины:

$$\Delta x_{инст} \leq \Delta_{Двх} + \Delta_{Лвых} + \Delta_{\varepsilon}, \quad (37)$$

где $|\varepsilon| \leq \Delta_\varepsilon$.

Обычно приведенными ко входу нормируются абсолютные погрешности датчиков температуры, а для линеаризаторов нормируются, как правило, приведенные погрешности относительно выходной, то есть измеряемой величины. Перевод характеристики относительной или приведенной погрешности к абсолютным значениям делается достаточно просто.

Характеристики абсолютной погрешности, стоящие в правой части неравенств (33) и (35), являются метрологическими характеристиками, которые нормируются для соответствующих компонент данного составного измерительного преобразователя. Однако в большинстве случаев для отдельных измерительных модулей нормируются приведенные погрешности. В этом случае метрологическая характеристика, а именно, характеристика погрешности рассмотренного составного преобразователя может быть вычислена по формуле

$$\gamma_{инст} = \left| \frac{\Delta x_{инст}}{x_{max}} \right| 100\% \leq \gamma_{Двх} + \gamma_{Лвых} + \gamma_\varepsilon, \quad (38)$$

Использование в формулах (33), (35), (36) производных от номинальной характеристики преобразования датчика не должно вызывать больших трудностей. Если номинальная характеристика задана аналитически, то проблемы практически отсутствуют. При табличном задании $f_D(x)$ эти производные вычисляются по конечным разностям.

Выше были рассмотрены упрощенные метрологические модели двухкомпонентных измерительных каналов. Однако в реальных измерительных каналах линеаризатору предшествует, как минимум, один линейный преобразователь (усилитель, фильтр, блок гальванического разделения и т.п.). Если такие преобразователи являются комплектующими элементами, выпускаются в соответствии с ТУ и проходят установленные для них метрологические испытания, то в общем случае характеристики их инструментальных погрешностей нормируются двучленной формулой с коэффициентами C и d . В этом случае относительная погрешность $\gamma_{кк}$ измерительных каналов измерительных систем, построенных по схеме рис. 24, нормируется также двучленной формулой

$$\gamma_{kk} \leq C_{kk} + d_{kk} \left(\left| \frac{x_{max}}{x} \right| - 1 \right), \quad (39)$$

где $d_{kk} = d + \gamma_{Двх} + \gamma_{Лвых} + \gamma_{\varepsilon}$, $C_{kk} = C + \gamma_{Двх} + \gamma_{Лвых} + \gamma_{\varepsilon}$,

$\gamma_{Двх}, \gamma_{Лвых}$, - характеристики приведенных погрешностей компонентов: датчика и линеаризатора.

Полученные формулы дают возможность вычислять характеристики основной погрешности модульных измерительных каналов систем, построенных методом агрегатирования.

5.4. Программное обеспечение средств измерений

Важнейшим компонентом современных измерительных информационных систем является их программное обеспечение, предназначенное для выполнения следующих функций:

- управление процессом измерений,
- математическая обработка результатов прямых измерений,
- представление результатов измерений и их обработки ,
- хранение результатов прямых, косвенных, совместных и совокупных измерений.

Перечисленные функции программного обеспечения находятся в сфере действия Закона РФ "Об обеспечении единства измерений" и поэтому программное обеспечение не только измерительных информационных систем, но и всех средств измерений, должно удовлетворять требованиям метрологического характера, которые сформулированы в ГОСТ Р 8.654 [12]. В самом деле, характеристики качества результатов измерений и результатов их математической обработки в сильной степени определяются последовательностью измерений, скоростью их выполнения, погрешностью результатов, вызванной округлением, аппроксимацией вычисляемых функций, наследственной погрешностью цифрового преобразования, которые определяются программой, реализуемой в компьютере или встроенном микропроцессоре. И если ранее речь шла о метрологических характеристиках физически реализуемых средств измерений и об обеспечении их неизменности, то здесь точно так же мы должны говорить о характеристиках

собственной погрешности, вносимой программами цифровой обработки, и о сохранности этих программ.

В состав собственных погрешностей, вносимых программами вычислений, входят погрешности от округления (количество разрядов цифровых кодов), методические погрешности, вызванные цифровой реализацией непрерывных функций, ограничением числа итераций итерационных процедур и наследственные погрешности, то есть погрешности результатов вычислений, вызванные погрешностями исходных данных (погрешностями результатов прямых измерений). Современное состояние средств вычислительной техники таково, что основной вклад в погрешность результатов обработки данных прямых измерений вносят наследственные погрешности. В стандарте [6] (п. 3.7.8) было сформулировано требование о необходимости снабжать программы вычислений характеристиками погрешности, которые они вносят, и в работе [13] достигнут определенный прогресс в оценке наследственной погрешности средствами программы, которая выполняет вычисления. В том же стандарте, в п. 3.7.6 сформулировано требование, касающееся обеспечения сохранности программ обработки данных в ИИС. Более того в работе [11] было выдвинуто требование о защите информации в ИИС. В современном стандарте ГОСТ Р 8.654 [12] эти все требования объединены и усилены.

Требования стандарта [12] адресованы разработчикам программного обеспечения ИИС и относятся, в основном к *метрологически значимым частям* программного обеспечения (ПО), то есть к программам и программным модулям, выполняющим функции сбора, передачи, обработки, хранения и представления измерительной информации. С целью удовлетворения этих требований разработчики программного обеспечения ИИС 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.

Проверку исполнения этих и некоторых других требований к ПО обычно выполняют при метрологических испытаниях ИИС на предмет утверждения типа и выдачи сертификата. В программе периодической поверки или калибровки сертифицированной таким образом ИИС обязательно предписывается проверка неизменности имени ПО, его версии и контрольной суммы.

Из перечисленных требований для ПО выбираются такие требования, которые соответствуют особенностям конкретной ИИС. Если ПО встроено в систему, проверка влияния на метрологические характеристики ИИС не выполняется, поскольку эта проверка выполняется при поверке или калибровке. При отсутствии связи с удаленными объектами проверка защиты от проникновения по этой связи искажающей информации нецелесообразна. Вообще обеспечение возможностей проверки требований к ПО ИИС возлагается на разработчика ПО.

Важной характеристикой ПО ИИС является уровень защищенности от преднамеренных или непреднамеренных воздействий во имя выполнения требования об единстве измерений.

Полная проверка целостности ПО ИИС и его защиты от преднамеренных и непреднамеренных искажающих воздействий выполняется в обязательном порядке при испытаниях ИИС с целью утверждения типа, занесения ИИС в государственный реестр средств измерений, допущенных к применению на территории РФ и выдачи сертификата на эту ИИС. Правила выполнения этой проверки изложены в нормативном документе [17]. Кроме того метрологически значимые программы подвергаются метрологической аттестации в соответствии с документом [18], хотя было бы, наверное, естественным подвергать метрологической аттестации такие программы, которые имеют в своем составе подпрограммы

оценки погрешностей результатов своих вычислений, как это сделано в работе [13].

Проверка защиты ПО ИИС выполняется в соответствии с документом [17]. Наименее трудоемкая проверка целостности ПО, которая может быть выполнена при каждом обращении, в том числе, при поверке ИИС – это вычисление контрольной суммы и сопоставление ее с тем значением, которое было предъявлено при испытании типа. Для вычисления контрольной суммы применяется алгоритм CRC или MD5.

При испытаниях ИИС в целях утверждения типа предъявляются следующие сведения о ПО: наименование ПО, описание его назначения, структуры и выполняемых функций, методов идентификации ПО, описание структуры ПО, описание расчетных алгоритмов, описание интерфейсов пользователя, меню, диалогов, описание интерфейсов связи, методов защиты ПО и данных, описание способов хранения данных.

Выполняются следующие виды проверок:

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.

Понятно, что подобные проверки могут быть выполнены только тогда, когда разработчик ПО сможет их обеспечить, выполнив все требования, сформулированные в документе [12].

6. Стандартизация

6.1. Значение стандартизации для общества

Цели стандартизации, установленные Законом РФ “О техническом регулировании” (далее - Законом РФ), свидетельствуют о том, что стандартизация охватывает практически все сферы деятельности и жизни людей. Продукт стандартизации, как вида деятельности, - это стандарты и другие нормативные документы всех видов (далее - стандарты). Стандарты являются разновидностью законодательных актов, непосредственно устанавливающих конкретные правила, нормы и численные выражения требований и норм. Они регулируют отношения между исполнителями и потребителями разнообразных услуг, между заказчиком и производителем продукции, между природоохранительными органами и субъектами хозяйственной деятельности, между работниками и работодателями в части выполнения обязательных мер по санитарии и безопасности труда, между участниками арбитражного или судебного производства. Стандартами устанавливаются нормы на параметры среды обитания населения, обеспечивающие безопасность жизнедеятельности. Мало того, должно выполняться требование о включении в договор, заключаемый между заказчиком и исполнителем, условий о соответствии работ и услуг действующим стандартам. При разработке федеральных или республиканских программ, в том числе, оборонного значения, в этих программах должны быть предусмотрены разделы нормативного обеспечения качества работ, то есть разделы разработки нормативной документации (стандартов, технических условий, справочников, методик испытаний и измерений и т.д.).

Стандартизация играет значительную роль в международных отношениях при торговле, при разделении труда и научно-технической кооперации, при разрешении споров в области экологии, поскольку международные стандарты, признанные сотрудничающими странами, устанавливают единые правила, нормы и технические требования к изделиям, продукции и к услугам и к их безопасности для здоровья, к методам испытаний и контроля качества изделий, продукции и услуг, к совместимости технических компонент изделий и сооружений, созда-

ваемых совместно, к информационной совместимости средств связи и т.д. При этом, в соответствии с Законом РФ если правила, установленные в отечественных стандартах, не соответствуют правилам, установленным в международных договорах Российской Федерации, то применяются правила международного договора.

Выполнение требований стандартов и других нормативных документов проверяется по единым для каждого вида продукции и услуг стандартизованным методикам, чтобы обеспечивалось взаимное доверие и признание результатов испытаний и, при необходимости, - объективное рассмотрение рекламаций и иных претензий. Проверка удовлетворения требованиям международных и национальных (государственных) стандартов выполняется при таможенном контроле, при лицензировании или аккредитации предприятий на право деятельности в той или иной сфере, при возникновении претензий по поводу качества изделий, сооружений, продуктов питания, услуг, при судебном или арбитражном производстве, а также по поводу нарушения правил санитарии и гигиены на объектах хозяйственной деятельности, загрязнения среды обитания. Подобная проверка может выполняться также по инициативе Федерального Агентства или иного компетентного государственного органа в профилактических целях или при подозрении в возможных нарушениях.

Непосредственное осуществление государственного контроля и надзора за соблюдением обязательных требований государственных стандартов проводится должностными лицами Госстандарта - государственными инспекторами по надзору за государственными стандартами, находящимися под охраной государства. В случае нарушений, выявленных при проверке, государственный инспектор имеет право на следующие действия: от выдачи предписаний по исправлению нарушений до представления в соответствующие органы, вплоть до прокуратуры, предложений по санкциям в отношении нарушителя. В число возможных санкций входят:

- штрафование нарушителей,
- аннулирование ранее выданных сертификатов на продукцию и услуги,
- лишение лицензий на право деятельности,
- аннулирование решений об аккредитации,
- возбуждение дел об уголовной, административной или гражданской ответственности.

При штрафовании нарушителей в распоряжение органов Федерального Агентства и других государственных органов в соответствии с Постановлением Верховного Совета РФ от 10.06.93 № 5156-1 поступает 20% от суммы полученных штрафов.

Помимо перечисленных мер административного воздействия субъекты всех сфер деятельности имеют объективный стимул для исполнения требований стандартов, а именно, сохранение и расширение рынка сбыта своей продукции и услуг.

В своей деятельности государственные инспекторы должны защищать интересы потребителей, субъектов хозяйственной деятельности и государства и несут ответственность, в частности, за разглашение государственной и коммерческой тайны, которой они вынужденно овладевают в процессе своей работы. Так, например, стандарты, связанные с военной техникой, связью, деятельностью ФСБ и новыми технологиями могут содержать секретные сведения, не подлежащие разглашению в интересах военной и экономической безопасности государства.

Все эти обстоятельства подчеркивают большое значение стандартизации для общества и высокую ответственность этой деятельности за создание непротиворечивой системы стандартов и иных нормативных документов, которые наряду с регламентацией жестких правил и норм не должны быть тормозом для технического прогресса и развития всех сфер жизни общества.

6.2. Государственная система стандартизации России

Основопологающим стандартом государственной системы стандартизации России является ГОСТ Р 1.0-92 “Государственная система стандартизации Российской Федерации. Основные положения”. Всем стандартам этой системы присваивается регистрационный номер, начинающийся с признака этой системы ‘1.’. Далее следует порядковый номер стандарта этой системы. После него через тире - год утверждения стандарта. При ссылках на стандарты всех систем год утверждения не указывается. В настоящем курсе мы придерживаемся этого правила за исключением нижеследующего перечня.

Названия всех стандартов этой системы начинаются словами “Государственная система стандартизации Российской Федерации.” (ГСС). Затем следует название конкретного стандарта. В настоящее время действуют следующие

стандарты ГСС, утвержденные в 1992 году (название системы дается в сокращении ГСС:

- ГОСТ Р 1.2 -92 “ГСС. Порядок разработки государственных стандартов”,
- ГОСТ Р 1.3 -92 “ГСС. Порядок согласования, утверждения и регистрации технических условий”,
- ГОСТ Р 1.4 -92 “ГСС. Стандарты предприятия. Общие положения”,
- ГОСТ Р 1.5 -92 “ГСС. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию стандартов”.

В основополагающем стандарте приведены термины и определения, касающиеся стандартизации, цели и принципы стандартизации, порядок организации работ по стандартизации.

Установлены следующие категории нормативных документов:

- государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р, утверждается Федеральным Агентством или Министерством архитектуры, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации,
- отраслевой стандарт ОСТ, утверждается министерством (ведомством) Российской Федерации,
- стандарт предприятия СТП - стандарт, утвержденный на предприятии и применяемый только на данном предприятии,
- технические условия ТУ- нормативный документ на конкретную продукцию (услугу), утвержденный предприятием-разработчиком по согласованию с предприятием-заказчиком (потребителем),
- стандарты научно-технических и инженерных обществ, ассоциаций и иных общественных объединений СТО - разрабатывают, утверждают и применяют в порядке, установленном этими обществами,
- международный стандарт - стандарт, принятый международной организацией по стандартизации (ИСО),
- региональный стандарт - стандарт, принятый региональной международной организацией по стандартизации (например, стандарты ЕЭС имеют аббревиатуру EN),
- межгосударственный стандарт (ГОСТ) - стандарт, принятый государствами, присоединившимися к соглашению о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации и применяемый ими непосредственно.

Как правило, стандарты принимаются при наличии консенсуса заинтересованных сторон, ибо стандарты разрабатываются с участием этих сторон и не должны служить средством принуждения или препятствием в развитии их отношений.

Разработка стандартов предприятия выполняется в соответствии с ГОСТ Р 1.4 и ГОСТ Р 1.5. Объектами стандартизации стандарта предприятия являются:

- составные части продукции, не являющиеся объектами самостоятельной поставки, технологическая оснастка и инструмент,
- технологические процессы, а также общие технологические нормы и требования к ним,
- услуги, оказываемые внутри предприятия,
- процессы организации и управления производством.

В качестве стандарта предприятия допускается применение международных, региональных и национальных стандартов других стран, если они не противоречат отечественным стандартам и отсутствуют разработанные на их основе стандарты России.

Стандарты предприятия не подлежат государственной регистрации.

Стандарты предприятия утверждает руководитель предприятия без ограничения срока действия.

Кроме перечисленных категорий существуют следующие нормативные документы

- методика института - научного метрологического центра (МИ),
- рекомендательный документ (РД),
- типовая программа (ТПр),
- правила (ПР).

В ГОСТ Р 1.0 установлены следующие виды стандартов:

- стандарты основополагающие (имеют организационно-методический характер),
- стандарты на продукцию, услуги,
- стандарты на процессы,
- стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа).

В государственной системе стандартизации России существуют несколько частных видов систем стандартизации, объединенных общими проблемами. Ре-

гистрационные номера стандартов и других нормативных документов, относящихся к одной частной системе, имеют в своем названии наименование системы стандартизации, а первые цифры, отделенные точкой от последующих - обозначают шифр этой системы. Приведем примеры обозначений наиболее употребляемых частных систем стандартизации:

- Единая система конструкторской документации
(ГОСТ 2. xxx “ЕСКД.”),
- Государственная система обеспечения единства измерений
(ГОСТ 8. xxx “ГСИ.”),
- Единая система технологической документации
(ГОСТ 3.xxx “ЕСТД.”),
- Прикладная статистика
(ГОСТ 11.xxx “Прикладная статистика.”),
- Система стандартов безопасности труда
(ГОСТ 12.xxx “ССБТ.”),
- Единая система технологической подготовки производства
(ГОСТ 14.xxx “ЕСТПП.”),
- Система разработки и постановки продукции на производство
(ГОСТ 15. xxx “СРПП.”),
- Охрана природы
(ГОСТ 17.xxx “Охрана природы.”),
- Единая система программной документации
(ГОСТ 19.xxx “ЕСПД.”),
- Единая система стандартов приборостроения
(ГОСТ 26. xxx “ЕССП.”).
- Надежность в технике
(ГОСТ 27.xxx “Надежность в технике.”),
- Система сертификации ГОСТ Р
(ГОСТ 40.xxx “Система сертификации.”).

6.3. Требования к содержанию стандартов на процессы и на продукцию

1*. На продукцию, услуги разрабатывают:

- стандарты общих технических условий, которые должны содержать общие требования к группам однородной продукции,
- стандарты технических условий, которые должны содержать требования к конкретной продукции, услуге.

Любой стандарт на продукцию, услуги должен содержать разделы:

- 1 Классификация, основные параметры, условное обозначение продукции,
- 2 Общие технические требования, в составе подразделов:

- 2.1 Характеристики, свойства

- 2.1.1 требования назначения,
- 2.1.2 метрологические характеристики (для средств измерений),
- 2.1.3 требования надежности,
- 2.1.4 требования радиоэлектронной защиты,
- 2.1.5 требования к стойкости к воздействиям и живучести,
- 2.1.6 требования эргономики,
- 2.1.7 требования технологичности,
- 2.1.8 конструктивные требования.

- 2.2 Требования к сырью, материалам, покупным изделиям

- 2.2.1 применение или ограничение применения сырья, материалов,
- 2.2.2 применение вторичного сырья и отходов производства.

- 2.3 Комплектность,

- 2.4 Маркировка

- 2.5 Упаковка.

- 3 Требования безопасности

- 3.1 требования электробезопасности,
- 3.2 требования пожарной безопасности,
- 3.3 требования взрывобезопасности,
- 3.4 требования радиационной безопасности,
- 3.5 требования химической безопасности,
- 3.6 требования к защитным средствам и мероприятиям.

- 4 Требования охраны окружающей среды.

- 5 Правила приемки.

- 6 Методы контроля.

- 7 Транспортирование и хранение.

- 8 Указания по эксплуатации.

9 Гарантии изготовителя.

2*. Стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа) должны обеспечивать объективную проверку всех обязательных требований к контролируемому объекту.

Для каждого метода в зависимости от специфики его проведения устанавливают:

- средства контроля и вспомогательные устройства,
- порядок подготовки к проведению контроля,
- порядок проведения контроля,
- правила обработки результатов контроля,
- допустимую погрешность измерений при контроле.

При указании средств контроля приводят перечень применяемого оборудования или метрологические характеристики, необходимые для обеспечения контроля с заданной точностью, а также перечень материалов и реактивов.

При применении оборудования или реактивов, изготавливаемых специально для данного испытания, производство которых отсутствует, в тексте документа или в приложении дают описание, схемы, рецептуру и т.п.

При изложении порядка подготовки к проведению контроля описывают соответствующую процедуру. При подготовке к химическому контролю указывают место и способ отбора образцов (проб), форму, вид, размеры или массу, а при необходимости, условия их хранения и (или) транспортирования.

При необходимости следует приводить структурную и функциональную схему измерительной установки, а также схемы соединения приборов или аппаратов.

При изложении требований к методике проведения контроля приводят характеристики условий контроля с допустимыми пределами их значений и погрешности воспроизведения, а также последовательность проводимых операций, если эта последовательность влияет на результат.

При изложении правил обработки результатов контроля приводят расчетные формулы и описание программ (если расчеты выполняются на компьютере). В приложении приводится исходный текст программы с указанием мер, предпринятых для ее защиты от несанкционированного редактирования.

При изложении требований к оформлению результатов контроля устанавливаются требования к протоколам контроля, форму таблиц, к содержанию и последовательности включаемых в них данных.

При изложении требований к точности измерений при контроле указывают допустимую погрешность измерений, точность вычислений и степень округления данных, а также приводят сведения о воспроизводимости и повторяемости результатов, обеспечиваемых данным методом контроля.

3*. В соответствии с ГОСТ Р 1.5 стандарты на процессы должны содержать в себе требования к методам и приемам выполнения процессов, к условиям их выполнения, требования к обеспечению безопасности персонала, объекта и населения, а также требования охраны окружающей среды в части воздействия на нее стандартизуемых процессов.

4*. Общие правила работы со стандартами.

При ссылке на стандарт не указывается год его выпуска.

Не допускается цитировать стандарты в законодательных и иных нормативных документах, в том числе, в стандартах.

Эти правила обоснованы тем, что при их соблюдении в случае пересмотра цитируемого или ссылочного стандарта не потребуется пересматривать документ, в котором сделана ссылка на него.

6.4. Межгосударственная система стандартизации

В межгосударственную систему стандартизации в соответствии с Соглашением от 13.03.92 № 12/1 (г. Москва) о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации” (далее Соглашением) и протоколом совещания руководителей органов государственного управления строительством “Об организации межгосударственного сотрудничества в области стандартизации и технического нормирования в строительстве” от 06.06.92 (г. Минск) входят:

Азербайджанская республика,
Республика Армения,
Республика Беларусь,
Республика Грузия,

Республика Казахстан,
Кыргызская республика,
Республика Молдова,
Российская Федерация,
Республика Таджикистан,
Туркменистан,
Республика Узбекистан,
Украина.

Объектами межгосударственной стандартизации являются объекты, представляющие межгосударственный интерес.

За основу межгосударственной системы стандартизации принята система стандартизации Российской Федерации. Основные положения, изложенные в предыдущем пункте, регистрационные номера и основное содержание российских стандартов сохранены за исключением следующих позиций:

- основополагающие стандарты межгосударственной системы стандартизации утратили в своем обозначении букву 'Р' и к ним применяется аббревиатура 'ГОСТ',

- стандарт ГОСТ 1.5 этой системы допускает публикацию стандартов системы кроме русского языка на государственном языке каждого из участников упомянутых соглашений,

- стандарты межгосударственной системы стандартизации считаются принятыми, если за них проголосует хотя бы два государства, остальные могут присоединяться по мере необходимости с предварительным извещением об этом решении,

- если государство-участник Соглашения, ранее проголосовавшее за принятие стандарта или присоединившееся к нему, имеет намерение прекратить его применение на своей территории без замены другим нормативным документом, оно направляет уведомление с указанием причины не позднее, чем за 9 месяцев до прекращения применения в компетентные органы Соглашения, а также в национальные органы по стандартизации государств - участников Соглашения.

6.5. Международное сотрудничество в области стандартизации

Российская Федерация осуществляет международное сотрудничество в области стандартизации путем непосредственного участия в разработке международных стандартов. Российская Федерация имеет свои представительства в основных организациях, разрабатывающих международные стандарты: в ИСО, МЭК, ЕВРОХИМ и других.

Основной международной организацией по стандартизации является ИСО (International Organisation for Standardization, 1, rue de Varembe, Geneve, Switzerland). Несмотря на рекомендательный характер большинства стандартов, разрабатываемых в рамках деятельности ИСО, эти стандарты транслируются во многих странах и применяются в них в качестве национальных стандартов. В особенности это касается стандартов в области управления качеством производства продукции и предоставляемых услуг. Наиболее значимыми среди стандартов ИСО являются стандарты серии ИСО 9000 “Стандарты в области управления качеством и обеспечения качества” и стандарты серии ИСО 10012 “Требования по обеспечению качества измерительного оборудования”.

В частности, стандарты серии ИСО 9000 применяются при решении вопросов о присуждении престижной ежегодной европейской премии качества предприятиям европейских стран. При этом необходимо отметить обязательные требования каждого из стандартов этой серии к выполнению работ по метрологическому обеспечению производства, как к одному из важнейших факторов обеспечения высокого качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг.

В Российской Федерации адаптируются стандарты ИСО и МЭК в русском переводе, как государственные стандарты. Пример обозначения государственного стандарта Российской Федерации, оформленного на основе применения аутентичного текста международного стандарта ИСО 9591-1993: ГОСТ Р ИСО 9591-93. Точно таким же образом должен обозначаться государственный стандарт, оформленный на основе аутентичного текста стандарта МЭК. Пример : ГОСТ Р МЭК 512-94.

7. Сертификация

7.1. Цели и значение сертификации

В соответствии с Законом РФ “О техническом регулировании” основными целями сертификации являются:

- содействие потребителям в компетентном выборе продукции,
- защита потребителя от недобросовестности изготовителя (продавца, исполнителя),
- контроль безопасности продукции для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества,
- подтверждение показателей качества продукции, заявленных потребителем.

Для достижения этих целей выполняется сертификация не только конечной продукции или оказанной услуги, но и сертификация систем обеспечения качества производства продукции и услуг.

Сертификация может выполняться путем испытания продукции в специальных испытательных лабораториях, а также путем экспертизы, для которой в качестве экспертов - аудиторов могут быть привлечены квалифицированные специалисты.

Законом предусмотрено создание систем сертификации, участниками которых могут быть государственные органы, а также предприятия любой формы собственности и ведомственного подчинения, а также некоммерческие общественные организации и объединения.

Документом, подтверждающим положительный результат сертификации, является *сертификат соответствия*. Кроме сертификата для этой же цели может применяться *знак соответствия*, который устанавливается каждой системой сертификации и может применяться после его обязательной государственной регистрации. Правила государственной регистрации знака соответствия устанавливает Федеральное Агентство РФ по стандартизации, метрологии и сертификации (далее - Федеральное Агентство).

Реклама продукции, подлежащей обязательной сертификации, но не имеющей сертификата соответствия, запрещена. В этой ситуации сертификат соответствия, полученный от системы добровольной сертификации, запрета не снимает.

В целях создания условий для участия в международном научно-техническом и экономическом сотрудничестве, а также в международной торговле отечественные нормативные документы согласуются с международными нормативными документами по сертификации и контролю систем обеспечения

качества на предприятиях. Это европейские нормы серии EN 45000, стандарты ИСО серии 9000, а также совместные документы ИСО и МЭК.

Ввоз на территорию Российской Федерации продукции и услуг возможен при наличии сертификата Российской Федерации или сертификата изготовителя (поставщика), признанного Федеральным Агентством.

Отношения в области сертификации регулируются Законом РФ “О техническом регулировании”, а также законодательными актами РФ и нормативными документами, которые разрабатывают организации и подразделения службы сертификации.

Если международным договором Российской Федерации установлены правила, не соответствующие законодательству Российской Федерации, то применяются правила международного договора.

7.2. Организационная структура службы сертификации

В состав структуры службы сертификации России входят (перечисляются в иерархическом порядке):

- Федеральное Агентство РФ по стандартизации, метрологии и сертификации,
- системы сертификации однородной продукции, услуг, систем качества предприятий,
- центральные органы систем сертификации,
- органы сертификации,
- испытательные лаборатории (центры).

Описанная структура представлена на рис. 23.

В компетенцию Федерального Агентства входит:

- формирование государственной политики в области сертификации,
- создание и государственная регистрация систем сертификации однородной продукции и услуг, а также однородной производственной деятельности предприятий всех форм собственности,
- представительство в международных (региональных) организациях по вопросам сертификации,

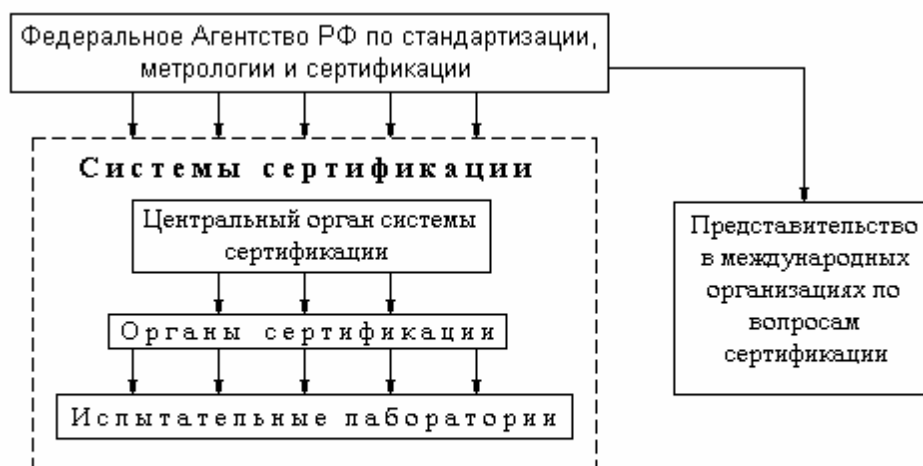


Рис. 23. Структура службы сертификации России

- установление правил признания зарубежных сертификатов, знаков соответствия и результатов испытаний,
- установление правил аккредитации и аккредитация органов сертификации и испытательных лабораторий систем сертификации,
- проведение государственного контроля и надзора за соблюдением правил сертификации, рассмотрение апелляций,
- выдача системам сертификации сертификатов и лицензий на применение знака соответствия.

Некоторые из перечисленных функций Федеральное Агентство может поручить другим государственным органам с выдачей соответствующей лицензии.

Система сертификации представляет собой совокупность участников сертификации однородной продукции, услуг и деятельности, осуществляющих сертификацию по правилам, установленным в данной системе в соответствии с Законом РФ “О техническом регулировании”. В систему сертификации могут входить предприятия, учреждения и организации любой формы собственности, в том числе, некоммерческие организации и объединения. В систему сертификации могут входить несколько систем сертификации однородной продукции и услуг.

В системе сертификации разрабатываются нормативные документы, в которых устанавливаются:

- объекты сертификации,
- организационная структура системы,
- функции участников системы,

- правила и порядок выполнения работ и форма сертификации,
- экономические принципы функционирования системы сертификации,
- знак соответствия и правила его применения,
- положение о порядке аккредитации органов сертификации и испытательных лабораторий,
- положения об органах сертификации и об испытательных лабораториях.

Перечисленные нормативные документы системы сертификации должны соответствовать Закону РФ “О техническом регулировании” и иным законодательным актам. При этом условии они являются основой для принятия решения о государственной регистрации данной системы.

Центральный орган системы сертификации:

- организует и координирует работу в возглавляемой им системе сертификации,
- рассматривает апелляции заявителей по поводу действий органов сертификации и испытательных лабораторий.

Органы сертификации:

- выполняют сертификацию, выдают сертификаты соответствия и лицензии на применение знака соответствия,
- приостанавливают или отменяют действие ранее выданных сертификатов.

Испытательные лаборатории осуществляют испытания продукции или оборудования предприятий (при сертификации их систем качества) и оформляют протоколы испытаний для целей сертификации. Форма и содержание протоколов должны соответствовать документу ИСО/МЭК - 45 “Руководящие положения по представлению результатов испытаний”.

Представленная структура и функции в равной степени относятся к системам как обязательной, так и добровольной сертификации.

7.3. Государственная регистрация, аккредитация и лицензирование

Государственная регистрация систем сертификации осуществляется Федеральным Агентством или иным полномочным государственным органом по результатам рассмотрения предъявленных нормативных документов. При государственной регистрации системы выполняется также:

- государственная регистрация знака соответствия системы сертификации,
- аккредитация органов сертификации.

Органы сертификации аккредитуют испытательные лаборатории системы и представляют их в государственные органы в целях получения лицензии на право выполнения работ.

При аккредитации и лицензировании органов сертификации и испытательных лабораторий предусматривается также сертификация систем качества самих этих органов и лабораторий, а также проводится проверка персонала на компетентность. В качестве руководящих методических материалов используются действующие международные документы, перечень которых приводится ниже.

ИСО 9000	"Общее руководство качеством и стандарты по обеспечению качества".
ИСО 10011 Часть 1	"Руководящие указания по проверке систем качества".
Руководство ИСО/МЭК-25	"Общие требования к оценке технической компетентности испытательных лабораторий"
Руководство ИСО/МЭК-38	"Общие требования к приемке испытательных лабораторий".
Руководство ИСО/МЭК-43	"Организация и проведение проверок на компетентность".
Руководство ИСО/МЭК-45	"Руководящие положения по представлению результатов испытаний",
Руководство ИСО/МЭК-49	"Руководящие положения по разработке руководства по качеству для испытательных лабораторий".
Руководство ИСО/МЭК-54	"Системы аккредитации испытательных лабораторий. Общие требования к приемке органов по аккредитации".
Руководство ИСО/МЭК-55	"Системы аккредитации испытательных лабораторий. Общие рекомендации по руководству действием систем",
Руководство ИСО/МЭК-56	"Орган по сертификации, методика оценки внутренней системы обеспечения качества".
EN 45003	"Общие критерии для органов по аккредитации лабораторий".

EN 45011	"Общие критерии для органов по сертификации, занимающихся сертификацией продукции".
EN 45012	"Общие критерии для органов по сертификации, занимающихся сертификацией систем качества."
EN 45013	"Общие критерии для органов по сертификации, занимающихся сертификацией персонала"

Более подробно с кругом работ в области сертификации можно ознакомиться по учебному пособию С.Н.Колпашникова и И.Б.Челпанова "Сертификация", Изд-во "Политехника", СПб, 2000 г.

Примеры погрешности применения средства измерений

1*. Погрешность e_I , вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям.

Объект измерения - стержень с неровными краями. При постановке задачи измерения длины такого стержня рассматриваемая погрешность определяется неровностью его краев вне зависимости от точности применяемого средства измерений. Варианты корректной постановки задачи измерения в этом случае:

- измерить среднюю длину стержня,
- измерить минимальную (или максимальную) длину.

Аналогичная ситуация возникает, например, при измерении высоты облаков над уровнем Земли или уровня воды в парогенераторе тепловой или атомной электростанции. Для корректной постановки задачи измерений в этих случаях необходимо определить математическую модель границы облаков и уровня Земли или границы между водой и перегретым паром. В противном случае результат измерений будет содержать неопределенность, равную неопределенности математического определения указанных границ и уровней.

Объект измерения - вал, сечение которого не является идеальным кругом. При постановке задачи измерения диаметра поперечного сечения такого вала рассматриваемая погрешность определяется отличием формы поперечного сечения от круговой вне зависимости от точности применяемого средства измерений.

Объект измерения - помещение. При трактовке результата измерения температуры в одной точке, как температуры воздуха в данном помещении, имеет место погрешность, равная разности между максимальной и минимальной температурами, вне зависимости от точности применяемого термометра. Варианты корректной постановки задачи измерений:

- измерить температуру воздуха в конкретной точке,
- измерить минимальную (или максимальную) температуру воздуха в помещении,
- измерить среднюю температуру воздуха в помещении.

Объект измерения - акватория Ладожского озера. Задача - измерение концентрации загрязнений воды (токсичных веществ, или нефтепродуктов, или ионов тяжелых металлов и т.д.). Ситуация аналогична предыдущей. Если результат количественного химического анализа пробы, изъятой в одном месте, распространяется на всю акваторию, рассматриваемая погрешность будет определяться неравномерностью содержания исследуемого загрязнения по всему озеру, каким бы точным не был этот анализ,

2.* Погрешность e_2 , вызванная взаимодействием средства измерений с объектом.

Объект измерения - электрическая цепь. Измерению подлежит параметр этой цепи, а именно, постоянное напряжение на ее участке, сопротивление которого равно R_H (см. рис. 1 а). Эквивалентное сопротивление остальной части цепи равно R_U . Истинное значение измеряемого напряжения, которое было на сопротивлении R_H 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.

$$U_x = E \frac{R_H}{R_H + R_U}, \quad \tilde{U} = E \frac{R_H R_g}{R_H R_g + R_H R_U + R_g R_U},$$

$$\Delta U = \tilde{U} - U_x = -E \frac{R_H^2 R_U}{(R_H R_g + R_H R_U + R_g R_U)(R_H + R_U)}.$$

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 эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{\tilde{U}} = - \frac{R_H \cdot R_U}{(R_H + R_U)} \cdot \frac{1}{R_B}.$$

Умножив числитель и знаменатель полученного выражения на (\tilde{U}^2) , увидим, что относительная погрешность, вызванная взаимодействием вольтметра и цепи, равна отношению энергий, то есть частному от деления энергии, потребляемой вольтметром, на энергию, рассеиваемую объектом:

$$\gamma_U = -\frac{R_H \cdot R_{Ц}}{(R_H + R_{Ц}) \cdot (\tilde{U})^2} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_B} = -\frac{(\tilde{U})^2}{R_B} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_{ЦВ}},$$

где $R_{ЦВ}$ - сопротивление, “видимое” со стороны вольтметра и равное сопротивлению, образованному параллельным соединением сопротивления нагрузки R_H и сопротивления цепи $R_{Ц}$.

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 п. 4.4, сопротивление вольтметра R_B есть одна из его метрологических характеристик, поскольку оказывает влияние на погрешность результата измерений.

Объект измерения - хорошо перемешиваемая жидкость в сосуде (рис. 1 б).

Измерению подлежит параметр объекта: температура жидкости. Масса жидкости m_1 , удельная теплоемкость c_1 , истинная температура t_x^o . Средство измерений - ртутный термометр, который будем считать абсолютно точным. Его масса m_o , удельная теплоемкость погружаемой части c_o . Собственная температура термометра до его погружения в жидкость равна t_o^o , 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:

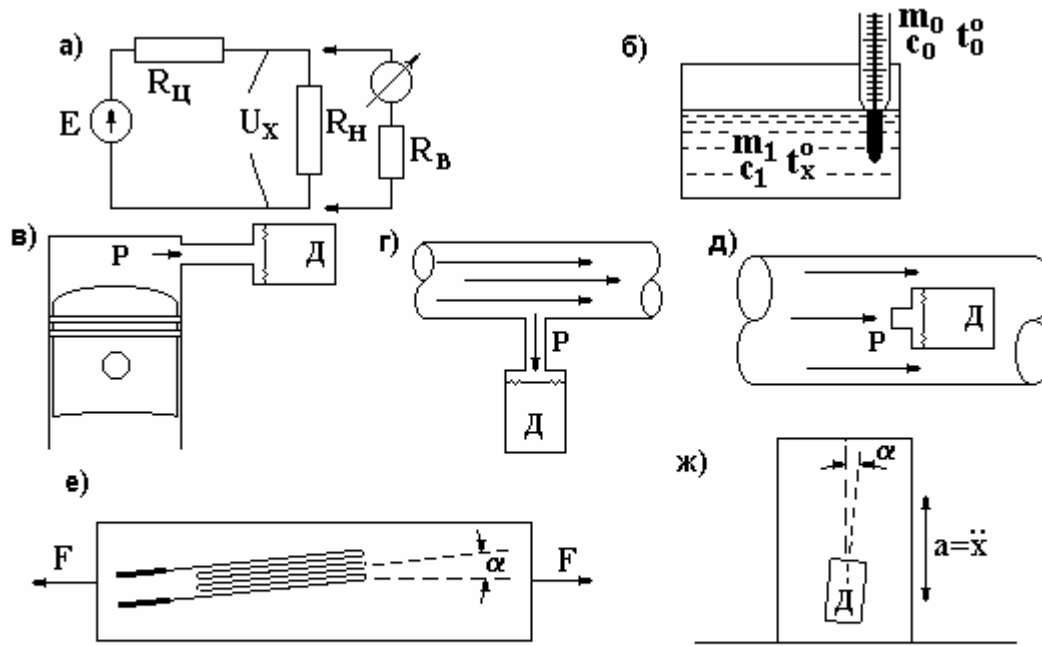


Рис.1. Примеры взаимодействия средств измерений с объектом измерений

$$t_o^o m_o c_o + t_x^o m_1 c_1 = \tilde{t}^o (m_o c_o + m_1 c_1),$$

где \tilde{t}^o - 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

$$\Delta t^o = \tilde{t}^o - t_x^o = - \frac{m_o c_o}{m_o c_o + m_1 c_1} (t_x^o - t_o^o).$$

По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_t = \frac{\Delta t^o}{\tilde{t}^o} = - \frac{m_o c_o (t_x^o - t_o^o)}{t_o^o m_o c_o + t_x^o m_1 c_1} = - \frac{Q_{TEPM}}{Q_\Sigma},$$

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° .

В соответствии с определением, приведенным в п. 4.4, 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. 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. 1 г, д). Параметр, подлежащий измерению - давление транспортируемого вещества. В одном случае (рис. 1 г) погрешность, вызванная нежелательным взаимодействием, будет отрицательной, в другом (рис. 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. 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 виб-

раций в заданной точке. Средство измерений - датчик ускорения, жестко устанавливаемый на объекте (рис. 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, обуславливающих степень взаимодействия с объектом и соответствующую погрешность.

3*. Погрешность e_3 , вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами

Эта погрешность возникает при измерении среднего значения пульсирующего давления, среднего значения выпрямленного переменного напряжения, при измерении малых напряжений в условиях действия помех, а также при преобразовании слабых сигналов измерительной информации, например, выходных сигналов датчиков в условиях энергоемкого промышленного производства.

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

В 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. Средства поверки

При проведении поверки должны быть применены средства, указанные в таблице 1.

Таблица 1

№ 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.

3. Операции поверки

При проведении поверки должны быть выполнены операции, указанные в таблице 2.

Таблица 2

№ п/п	Наименование операции поверки	Номер пункта методики поверки	Обязательность проведения операции при		
			Выпуске из производства	Эксплуатации и хранения	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.

4. 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.

4. Требования безопасности

Излагаются требования, обеспечивающие при поверке безопасность труда, производственную санитарную, охрану окружающей среды. Допускаются ссылки на нормативные документы по вопросам техники безопасности. Указывается влияние (отсутствие влияния) операций поверки на экологическую безопасность.

5. 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.

6. 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 выполнении 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.

9. Оформление результатов измерений

Положительные результаты поверки оформляются свидетельством о поверке и (или) клеймением поверяемых средств измерений и записью о сроке последующей поверки.

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 указывается дата поверки, место ее проведения, перечень средств, использованных для поверки, результаты каждой операции, значения метрологических характеристик, полученных в ходе поверки, и результаты их сопоставления с установленными нормами. Протокол подписывает поверитель, выполнивший поверку.

Настоящий документ может иметь приложения: обязательные и справочные.