

А.А. Данилов

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Данилов, А. А. Метрологическое обеспечение измерительных систем: учеб. пособие / А. А. Данилов. – Пенза: Профессионал, 2008. – 63 с.

Рассматриваются признаки классификации измерительных систем и их измерительных каналов, нормируемые метрологические характеристики измерительных каналов и методы подтверждения их соответствия установленным нормам, приводятся рекомендации по реализации метрологического обеспечения измерительных систем.

Книга предназначена для студентов специальности “Метрология и метрологическое обеспечение”, может быть полезна инженерно-техническим и научным работникам, аспирантам и студентам приборостроительных специальностей.

© А.А. Данилов, 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ



Теоретические основы измерительных систем и методы их метрологического обслуживания достаточно подробно рассмотрены в книге Удовиченко Е.Т. “Метрологическое обеспечение измерительных информационных систем” (М.: Изд-во стандартов, 1991), которая была написана задолго до введения в действие ГОСТ Р 8.596. Поэтому многие положения, рассматриваемые в ней, сегодня уже устарели.

В настоящей книге, опираясь на требования действующих нормативных документов, автор предпринял попытку провести классификацию измерительных систем и их измерительных каналов, рассмотреть вопросы нормирования метрологических характеристик измерительных каналов измерительных систем и методы подтверждения их соответствия установленным нормам, а также привести рекомендации по практической реализации метрологического обеспечения измерительных систем.

Автор с благодарностью примет все замечания читателей, направленные по адресу: danilov@sura.ru .

20 августа 2008 г.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АИИС КУЭ – автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта электроэнергии

ВК – вычислительный компонент

ИВК – измерительно-вычислительный комплекс

ИК – измерительный канал

ИП – измерительный преобразователь

ИС – измерительная система

МХ – метрологические характеристики

ПИП – первичный измерительный преобразователь

ПО – программное обеспечение

СИ – средства измерений

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

1.1. Термины и определения

В соответствии с ГОСТ Р 8.596 [1] под *измерительной системой* (ИС) понимается совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов ИС), функционирующих как единое целое, предназначенной для:

- получения информации о состоянии объекта с помощью измерительных преобразований в общем случае множества изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние;
- обработки результатов измерений;
- регистрации и индикации результатов измерений и результатов их обработки;
- преобразования этих данных в выходные сигналы системы в разных целях.

Различают ИС, изготавливаемые серийно, так называемые типовые ИС (далее – ИС-1) и ИС единичных экземпляров (далее – ИС-2).

ИС-1 выпускаются изготовителем как законченные укомплектованные изделия, для установки которых на месте эксплуатации достаточно указаний, приведенных в эксплуатационной документации, в которой нормированы метрологические характеристики (МХ) измерительных каналов (ИК) ИС.

ИС-2 проектируются для конкретных объектов (группы типовых объектов) и принимаются как законченные изделия непосредственно на объекте эксплуатации. Установку таких ИС на месте эксплуатации осуществляют в соответствии с проектной документацией на ИС и эксплуатационной документацией на её компоненты, в которой нормированы МХ ИК ИС и её компонентов.

Перечисленные виды ИС могут быть использованы как автономно, так и в составе более сложных структур (информационно-измерительных систем; систем контроля, диагностирования, распознавания образов, испытательного оборудования, а также автоматических систем управления технологическими процессами).

Под *измерительным каналом* ИС [1] понимается конструктивно или функционально выделяемая часть ИС, выполняющая законченную функцию от восприятия измеряемой величины до получения результата её измерений, выражаемого числом или соответствующим ему кодом, или до получения аналогового сигнала, один из параметров которого – функция измеряемой величины.

Взаимодействие ИС с объектом иллюстрируется с помощью рис. 1.

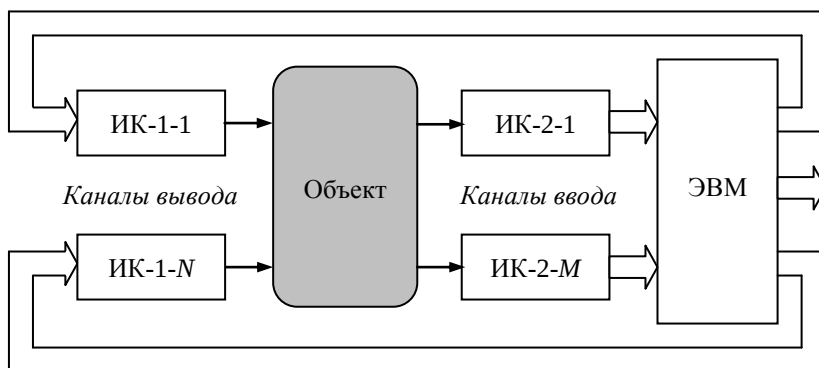


Рис. 1. Взаимодействие ИС с объектом

Измерительные каналы ввода ИК-2 предназначены для получения информации о состоянии объекта, измерительные каналы вывода ИК-1 предназначены для формирования воздействий на объект, а ЭВМ – для обработки результатов измерений, регистрации и индикации результатов измерений и результатов их обработки.

Измерительные каналы состоят из **компонентов**, под которыми понимают технические устройства, входящие в состав ИС и выполняющие одну из функций, предусмотренных процессом измерений.

В соответствии с этими функциями компоненты подразделяют на:

- измерительные,
- связующие,
- вычислительные,
- комплексные
- вспомогательные.

Назначение компонентов ИС и примеры устройств, реализующих их, приведены в таблице 1.

Измерительные каналы ИС могут быть простыми и сложными.

В **простом** ИК реализуется прямой метод измерений путем последовательных измерительных преобразований.

Сложный ИК в первичной части представляет собой совокупность нескольких простых ИК, сигналы с выхода которых используются для получения результата косвенных, совокупных или совместных измерений или для получения пропорционального ему сигнала во вторичной части сложного ИК ИС.

Таблица 1 – Назначение компонентов ИС

Наименование	Назначение	Устройства, реализующие компонент ИС
Измерительный компонент ИС	Для измерений и измерительных преобразований величин	Средство измерений, для которого отдельно нормированы метрологические характеристики: измерительный прибор, измерительный преобразователь (первичный, промежуточный, измерительный коммутатор, искробезопасный барьер, аналоговый фильтр и т.п.), мера
Связующий компонент ИС	Для передачи с минимально возможными искажениями сигналов, несущих информацию об измеряемой величине от одного компонента ИС к другому	Техническое устройство или часть окружающей среды: проводная линия связи, радиоканал, телефонная линия связи, высоковольтная линия электропередачи с соответствующей каналообразующей аппаратурой, переходные устройства (клеммные колодки, кабельные разъемы и т.п.)
Вычислительный компонент ИС	Для вычислений результатов прямых, косвенных, совместных или совокупных измерений, а также для реализации логических операций и управления работой ИС	Цифровое вычислительное устройство (или его часть) с программным обеспечением
Комплексный компонент ИС	Для завершения измерительных преобразований, вычислительных и логических операций, а также для выработки выходных сигналов ИС	Измерительно-вычислительный комплекс, контроллер, программно-технический комплекс, блок удаленного ввода-вывода и т.п.
Вспомогательный компонент ИС	Для обеспечения нормального функционирования ИС, но не участвует непосредственно в измерительных преобразованиях	Блок питания, система вентиляции, устройства, обеспечивающие удобство управления и эксплуатации ИС и т.п.

1.2. Классификация измерительных систем

Некоторые признаки классификации ИС и их ИК приведены в нормативной документации [1, 2]. Разумеется, они использованы ниже, но доработаны с целью удовлетворения требованиям дихотомии¹.

Наиболее существенным признаком классификации ИС, введённым ГОСТ Р 8.596 [1], является особенность проектирования:

- без “привязки” к объекту – ИС-1 (так называемая типовая ИС);
- под конкретный объект (группу объектов) – ИС-2 (так называемая ИС единичных экземпляров).

ИС-1 выпускаются “изготовителем как законченные укомплектованные ... изделия” [1], а потому приёмку ИС-1 и её первичную поверку целесообразно проводить у изготовителя. При этом номенклатура и количество ИК могут существенно изменяться для различных модификаций – для некоторых модификаций в состав ИС-1 могут быть включены все виды ИК в максимальном количестве, для других же модификаций ИС-1 – некоторые виды ИК могут отсутствовать вообще. В процессе эксплуатации ИС-1 количество ИК может изменяться в пределах, регламентированных описанием типа. При необходимости внесения изменений в номенклатуру (измеряемые величины, диапазоны измерений, метрологические характеристики) и количество ИК изготовитель имеет право внести изменения в описание типа ИС-1 после проведения испытаний для целей проверки соответствия утверждённому типу [3].

ИС-2 проектируются “для конкретных объектов” [1], а потому приёмка ИС-2 проводится преимущественно после монтажа ИС на объекте. При этом номенклатура и количество ИК регламентированы описанием типа. В процессе эксплуатации ИС-2 количество ИК может лишь уменьшаться (за счёт исключения части ИК из сфер государственного регулирования обеспечения единства измерений). Внесение изменений в описание типа ИС-2 не предусмотрено, т.к. ИС-2 представляет собой единичный экземпляр средств измерений [3].

К другим классификационным признакам ИС могут быть отнесены характер обслуживания (обслуживаемые – не обслуживаемые) и распределённость на объекте (локализованные – распределённые).

Для класса обслуживаемых ИС характерно наличие одной или нескольких процедур, выполняемых многократно (периодически): тех-

¹ Дихотомия (от греч. *dichotomia* – разделение надвое) – способ классификации, при котором классы разбиваются на пары “соподчиненных” элементов (подклассов).

нического обслуживания, ремонта, градуировки, поверки (или калибровки). Для класса необслуживаемых ИС (к которым относятся, например, аэрологические ИС – радиозонды для получения метеоинформации) градуировка и первичная поверка (или калибровка) выполняются лишь однократно – после изготовления. При этом проведение технического обслуживания, ремонта и периодической поверки (или калибровки) необслуживаемых ИС не предусмотрено, т.к. срок службы таких ИС относительно невелик, а сами ИС могут быть реализованы с резервированием ИК.

Для класса локализованных ИС метрологическое обслуживание в большинстве случаев может быть выполнено одним специалистом, в то время как для класса распределённых ИС может потребоваться не менее двух специалистов.

Могут быть использованы и другие классификационные признаки, например, наличие резервных ИК, возможность временных перерывов в работе ИС (или части её ИК) и другие.

В качестве иллюстрации на рис. 2 [4] приведена классификация ИС, отражающая количественное соотношение ИС по каждому из рассмотренных признаков.

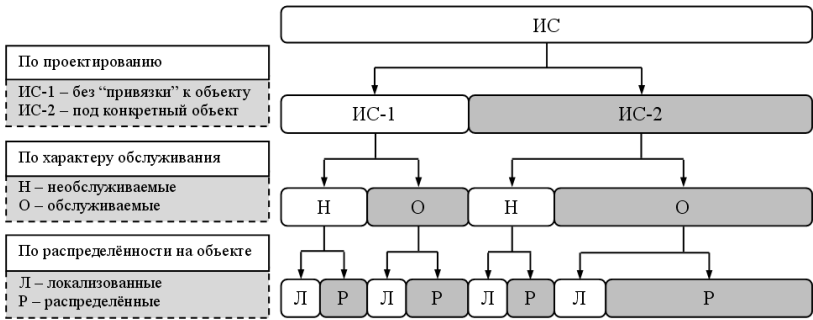


Рис. 2. Классификация ИС

Разумеется, здесь и ниже автор не ставил своей целью пересчитать ИС и ИК, чтобы выявить фактическое количественное соотношение для каждого из анализируемых признаков. Поэтому на рис. 2-4, 7, 8 количественные соотношения между признаками приводятся лишь условно и отражают точку зрения автора. Так, в соответствии с рис. 2, по мнению автора, наиболее распространёнными являются территориально распределённые обслуживаемые ИС, спроектированные под конкретный объект, а наименее распространёнными – территориально локализованные необслуживаемые типовые ИС.

Сформулируем особенности и требования к метрологическому обеспечению ИС, вытекающим из предложенных признаков классификации, приведённым в таблице 2.

Таблица 2 – Особенности и требования к МО ИС

№	Признак классификации	Классы ИС	
1	По проектированию ИС	ИС-1	ИС-2
	Особенности ИС		
	1. Номенклатура и количество ИК	Могут варьироваться в пределах описания типа	Регламентированы описанием типа
	2. Состав ИК	Регламентирован описанием типа	
	3. Модернизация	Возможна в пределах описания типа	Не предусмотрена
	Процедуры МО ИС		
	1. Приёмо-сдаточные испытания	Проводятся либо у изготовителя, либо на объекте	Проводятся на объекте
	2. Испытания для целей утверждения типа	Проводятся для одного или нескольких экземпляров ИС-1, включающих все типы ИК по номенклатуре и составу, регламентированные описанием типа	Проводятся для каждого экземпляра ИС-2
	3. Испытания для целей проверки соответствия утверждённому типу	Проводятся при: а) ухудшении качества ИС; б) внесении изменений, влияющих на МХ; в) истечении срока действия сертификата об утверждении типа (5 лет)	Не предусмотрены

Продолжение таблицы 2 – Особенности и требования к МО ИС

№	Признак классификации	Классы ИС	
	4. Первичная поверка при вводе в эксплуатацию	Проводится для каждого экземпляра ИС либо у изготовителя, либо на объекте	Не предусмотрена – свидетельство о поверке оформляется по результатам испытаний для целей утверждения типа
	5. Первичная поверка после ремонта	Проводится на объекте	
	6. Периодическая поверка	Проводится на объекте	
2	По характеру обслуживания	Необслуживаемые	Обслуживаемые
	Процедуры МО ИС		
	1. Поверка	Только первичная при вводе в эксплуатацию	Как первичная при вводе в эксплуатацию, так и периодическая
	2. Техническое обслуживание, настройка, ремонт	Не предусмотрены	Возможны
3	По распределённости на объекте	Локализованные	Распределённые
	Особенности МО ИС		
	1. Количество используемого персонала	Достаточно одного специалиста	Не менее двух специалистов
	2. Оснащённость персонала средствами связи	Не обязательно	Обязательно
	3. Требования к эталонам	Существенных требований к габаритам, массе, мобильности не предъявляется	Малогабаритные, лёгкие, мобильные, с малыми затратами времени на подготовку к работе, сохраняющие МХ в широком диапазоне рабочих условий эксплуатации
	4. Требования к контролю условий эксплуатации	Достаточен контроль условий в одном помещении	Требуется контроль условий в нескольких помещениях

1.3. Классификация измерительных каналов

Рассмотрим теперь классификационные признаки ИК.

Первый классификационный признак – вид входной/выходной величин – подразделяет ИК на два класса: аналого-цифровые и цифроаналоговые ИК. Аналого-цифровые ИК предназначены для измерений величин, т.е. для ввода информации в вычислительный компонент ИС, а цифроаналоговые ИК – для воспроизведения величин, т.е. для вывода информации из вычислительного компонента ИС. Разумеется, методы проверки соответствия МХ ИК установленным нормам имеют принципиальные отличия для аналого-цифровых и цифроаналоговых ИК [2, 5, 6].

Второй классификационный признак – метод измерений – также подразделяет ИК на два класса: простые и сложные ИК [1]. В простых ИК реализованы прямые методы измерений, а в сложных – косвенные, совокупные или совместные.

Установление норм на МХ простых ИК обычно не вызывает трудностей, а установление норм на МХ сложных ИК достаточно трудоёмко и сопряжено с решением сложной методической проблемы. Указанная проблема заключается в том, что один и тот же результат косвенных (совместных или совокупных) измерений может быть получен при различных сочетаниях результатов прямых измерений простых ИК, образующих сложный ИК [7]. Поэтому для того, чтобы установить нормы на МХ сложных ИК, необходимо предварительно оценить границы погрешности результата измерений сложного ИК для всех возможных сочетаний результатов прямых измерений простых ИК², образующих сложный ИК, и лишь затем выбрать максимальные из них. Такое решение нельзя признать удовлетворительным, т.к. оно приводит к существенному “загрублению” МХ сложных ИК. В качестве альтернативы могут быть установлены нормы на средневзвешенную погрешность, полученную усреднением погрешности результата измерений сложного ИК для всех возможных сочетаний результатов прямых измерений простых ИК, образующих сложный ИК [8].

Третий классификационный признак – постоянство структуры ИК на этапе эксплуатации – подразделяет ИК на два класса: с постоянной или варьируемой структурой. При этом к ИК с варьируемой структурой могут быть отнесены некоторые ИК с коммутаторами, например,

² Например, один и тот же результат измерений сопротивления 1 Ом может быть получен при различных сочетаниях результатов измерений напряжения и тока: 100 мВ и 100 мА, 1 В и 1 А и др. При этом границы погрешности результата измерений сопротивления могут оказаться различными.

многопредельные ИК с автоматическим выбором диапазона измерений. Для таких ИК также существует методическая проблема, заключающаяся в нормировании МХ при скачкообразном изменении границ погрешности при переключении коммутаторов, возникающем (для приведённого примера) при изменении диапазона измерений многопредельных ИК. Получается, что в окрестности точки диапазона измерений, соответствующей переключению пределов, результаты измерений могут обладать существенно различающимися границами погрешности. Ничего страшного в этом, конечно нет, достаточно применить нормирование погрешности, аналогичное нормированию погрешностей многопредельных приборов.

В качестве иллюстрации на рис. 3 [4] приведена классификация ИК ИС, отражающая количественное соотношение ИК по рассмотренным конструктивно-функциональным признакам.

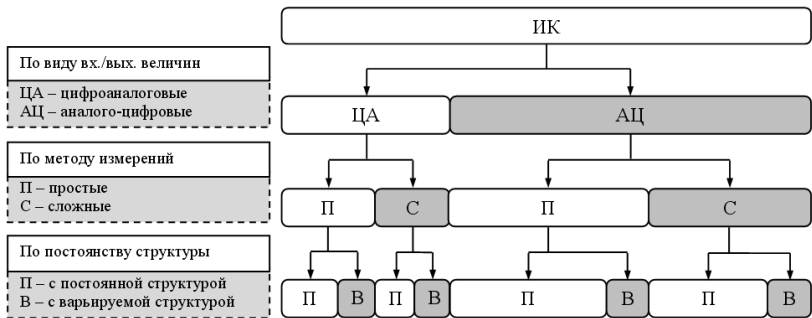


Рис. 3. Классификация ИК по конструктивно-функциональным признакам

Рассмотрим теперь признаки, отражающие особенности метрологического обеспечения ИК.

Первый из таких признаков – передача размера единиц величин – подразделяет ИК на два класса: с поэлементным и комплектным способами передачи размера единиц величин.

Применение комплектного способа передачи размера единиц величин, пропагандируемого некоторыми специалистами, не всегда целесообразно. Во-первых, при комплектном способе передачи размера единиц величин может произойти взаимная компенсация погрешностей компонентов, образующих ИК, в точках, подлежащих контролю, в то время как в других точках диапазона измерений ИК погрешность может превысить установленные для неё нормы [9]. Во-вторых, для сложного ИК обслуживаемой ИС, территориально распределённой на объекте, в качестве альтернативы целесообразно использовать передачу размера единиц величин простым ИК, входящим в состав сложно-

го ИК, и проверку программного обеспечения, реализующего сложный ИК с помощью вычислительного компонента ИС.

Второй признак – индивидуальность МХ – подразделяет ИК на два класса: на ИК, для которых регламентированы МХ, индивидуальные для каждого ИК, и ИК, для которых регламентированы МХ на группу ИК. При нормировании МХ для группы ИК замена одних компонентов ИК (при проведении ремонта) на другие однотипные не приводит к изменению МХ ИК. Поэтому указание заводских номеров компонентов в описании типа ИС для таких ИК нецелесообразно. В случае же нормирования МХ, индивидуальных для каждого ИК (что обычно используется для повышения точности ИК), замена одних компонентов ИК на другие однотипные может привести к изменению МХ ИК. Поэтому для таких ИК в описании типа ИС целесообразно указывать заводские номера компонентов, образующих ИК.

И, наконец, третий признак – по МХ в условиях применения – подразделяет ИК также на два класса: на ИК, для которых выполнено нормирование МХ с разделением погрешности на составляющие (основную и дополнительные), и ИК, для которых нормирование МХ выполнено без разделения погрешности на составляющие (т.е. для рабочих условий эксплуатации). Разумеется, нормирование МХ без разделения погрешности на составляющие возможно в следующих случаях:

- при незначительном влиянии изменений условий эксплуатации ИС на МХ ИК (что возможно либо при сужении диапазона изменений влияющих величин, либо при использовании конструкторско-технологических или структурно-алгоритмических методов обеспечения требуемой точности ИК при изменении влияющих величин в широких пределах [10]);

- при “загрублении” МХ ИК (что приводит к существенному увеличению границ погрешности ИК, достижение которых реальным ИК маловероятно).

Нормирование МХ для рабочих условий эксплуатации нецелесообразно в случае изменения влияющих величин в широких пределах. Дело в том, что для передачи размера единиц величин будут использоваться эталоны, сохраняющие свои МХ в достаточно узком диапазоне изменений влияющих величин. Именно этот диапазон изменений влияющих величин целесообразно использовать для назначения нормальных условий (при проведении комплектной поверки).

В качестве иллюстрации на рис. 3 [4] приведена классификация ИК ИС, отражающая количественное соотношение ИК по каждому из признаков, отражающих особенности метрологического обеспечения ИК.

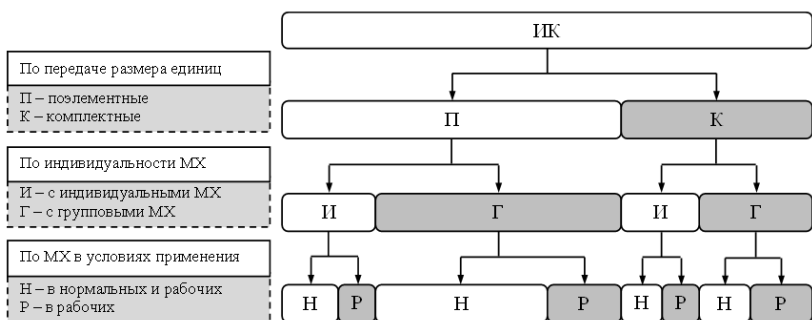


Рис. 4. Классификация ИК по признакам, отражающим особенности метрологического обеспечения ИК

Рассмотренные признаки позволяют предъявлять обоснованные требования к метрологическому обеспечению на всех стадиях жизненного цикла ИС и будут использованы в последующих главах.

Здесь же ограничимся рассмотрением признаков классификации на примере автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учёта электроэнергии, так называемых АИИС КУЭ.

Такие системы обычно проектируются под конкретный объект, являются обслуживаемыми и территориально распределены на объекте, а потому метрологическое обеспечение АИИС КУЭ возможно с участием не менее двух специалистов³, оснащенных, в том числе, и средствами связи.

Каналы измерений электрической энергии и мощности АИИС КУЭ являются аналого-цифровыми, сложными, могут быть как с постоянной, так и с варьируемой структурой (что должно найти отражение при установлении норм на МХ ИК с варьируемой структурой). Передача размера единиц величин в таких каналах осуществляется поэлементно, МХ нормируются для группы ИК с разделением на составляющие, хотя возможно применение нормирования для каждого ИК индивидуально [11].

³ Следует отметить, что в метрологическом обеспечении АИИС КУЭ некоторых энергообъектов с учётом вспомогательного персонала могут участвовать несколько десятков и даже сотен человек.

2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ: ПРОЦЕДУРЫ, НОРМИРОВАНИЕ, МЕТОДЫ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ

2.1. Процедуры метрологического обеспечения на стадиях жизненного цикла ИС

В соответствии с ГОСТ Р 8.596 [1] метрологическое обеспечение ИС включает в себя следующие виды деятельности, реализуемые на стадиях жизненного цикла ИС:

- нормирование и расчет метрологических характеристик ИК ИС;
- метрологическая экспертиза технической документации на ИС;
- испытания ИС для целей утверждения типа;
- поверка и калибровка ИС;
- метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением ИС.

Жизненный цикл ИС, как и любой другой продукции, состоит из множества стадий [12], таких как разработка технического задания, разработка документации всех видов (конструкторской, технологической, проектной, эксплуатационной), разработка и изготовление ИС, ввод ИС в опытную и промышленную эксплуатацию, непосредственно эксплуатация ИС, техническое обслуживание, ремонт и модернизация ИС, демонтаж и утилизация ИС. При этом каждая из стадий жизненного цикла ИС неразрывно связана с решением многочисленных задач по обеспечению единства измерений. Взаимосвязь между некоторыми из них представлена в таблице 3.

Практически каждый из видов деятельности по обеспечению единства измерений регламентирован требованиями нормативных документов. Так, проведение метрологической экспертизы документации всех видов регламентируется как общим [1], так и частными документами [13, 14], испытания для целей утверждения типа (в том числе, и проверки соответствия утверждённому типу) и поверка ИС – соответствующими правилами [3, 15].

Вместе с тем, следует отметить, что перечисленных документов явно недостаточно для практической деятельности по метрологическому обеспечению ИС. Так, разработчикам документации на ИС были бы полезны документы, регламентирующие требования к разделам типового проекта ИС, документы, отражающие состав рекомендуемых показателей надёжности ИС и порядок их оценки, а метрологам – документы, регламентирующие типовую программу испытаний ИС, порядок проведения поверки ИС и др.

Таблица 3 – Виды деятельности по обеспечению единства измерений на стадиях жизненного цикла ИС

№	Стадии жизненного цикла ИС	Деятельность по обеспечению единства измерений
1	Разработка технического задания	Метрологическая экспертиза технического задания
2	Разработка ИС	Метрологическая экспертиза: – конструкторской документации – технологической документации – проектной документации – эксплуатационной документации
3	Опытная эксплуатация	1. Испытания для целей сертификации (на электромагнитную совместимость, электробезопасность, искробезопасность, взрывозащиту и т.д.) 2. Испытания для целей утверждения типа, включая метрологическую экспертизу программы испытаний и методики поверки
4	Изготовление ИС	1. Метрологическое обеспечение производства ИС 2. Приёмо-сдаточные испытания
5	Ввод в промышленную эксплуатацию	Первичная поверка (калибровка)
6	Промышленная эксплуатация	Периодическая поверка (калибровка)
7	Модернизация: – замена компонентов – ввод новых ИК – ввод новых функций – модернизация ПО	1. Испытания для целей проверки соответствия утверждённому типу 2. Первичная поверка (калибровка)
8	Техническое обслуживание и ремонт	Первичная поверка (калибровка)

Отличительной особенностью ИС является то, что они представляют собой многофункциональные средства измерений многочисленных физических величин и состоят из множества компонентов, работающих в различных условиях эксплуатации. Именно поэтому проведение **метрологической экспертизы** документации на ИС является чрезвычайно сложной и важнейшей задачей, неразрывно связанной как с нормированием МХ ИК ИС, так и с методами подтверждения соответствия МХ установленным нормам. Проведение метрологической экспертизы осложняется ещё и тем, что МХ компонентов ИС могут быть нормированы по-разному, воздействие некоторых влияющих величин на МХ компонентов ИС не учтено и т.д.

Метрологической экспертизе подвергают следующую документацию [1]:

- техническое задание на разработку (проектирование) ИС;
- технические условия, руководство по эксплуатации, конструкторскую и технологическую документацию – для ИС-1;
- проектную и эксплуатационную документацию, предназначенную для комплектации, монтажа, наладки и эксплуатации – для ИС-2;
- методику расчета МХ ИК ИС по МХ измерительных и связующих компонентов с учетом, при необходимости, программы обработки, реализуемой вычислительным компонентом, – для ИС-2;
- программу и методику испытаний ИС;
- проект методики поверки (калибровки) ИС.

Согласно ГОСТ Р 8.596 [1] основным содержанием метрологической экспертизы технического задания на разработку (проектирование) ИС является **проверка достаточности исходных требований**, приводимых в проекте технического задания, используемых как для рационального нормирования МХ ИК ИС на этапе разработки (проектирования), так и для построения эффективного способа метрологического обеспечения ИС на последующих этапах её жизненного цикла.

Среди задач, решаемых при проведении метрологической экспертизы технического задания, наиболее трудоёмкими (и значимыми!) являются задачи, связанные с проверкой:

- правильности разграничения измерительных функций и измерительных каналов ИС в составе более сложных структур, например, в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами, систем контроля и диагностики, систем учёта и т.д.;
- правильности назначения норм точности и соответствия способов их нормирования требованиям нормативных документов;
- реализуемости метрологического обслуживания ИС (с учётом различных ограничений, таких как: отсутствие доступа к входу ИС,

невозможность организации перерывов в функционировании ИС, обеспеченность эталонами и иными СИ, позволяющими проводить проверку МХ ИК ИС в рабочих условиях эксплуатации ИС и т.д.);

– соответствия показателей надёжности и способов их нормирования установленным требованиям, в том числе и согласованности с интервалами между поверками (или калибровками).

Приведу примеры разграничения измерительных функций и ИК ИС в составе других структур, а также определения достаточности номенклатуры ИК, как одной из наиболее сложных задач, возникающих при проведении метрологической экспертизы технического задания.

Пример 1

Рассмотрим один из каналов системы контроля, изображённый на рис. 5 и состоящий из измерительного преобразователя (ИП) и устройства допускового контроля и регистрации результатов (УДКиР).

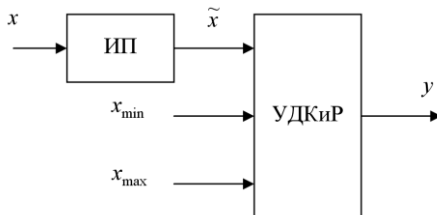


Рис. 5. Структурная схема канала системы контроля

В таком канале измерению (измерительному преобразованию) подлежит физическая величина x , а непосредственно процесс измерений заканчивается в измерительном преобразователе ИП получением оценки $\tilde{x}$ измеряемой физической величины, поскольку в УДКиР осуществляется лишь допусковый контроль и регистрация результатов, полученных в соответствии с алгоритмом

$$y = \begin{cases} y_1, & \text{при } \tilde{x} < x_{\min} \\ \tilde{x}, & \text{при } x_{\min} \leq \tilde{x} \leq x_{\max} \\ y_2, & \text{при } x_{\max} < \tilde{x} \end{cases},$$

где $x_{\min}$ и $x_{\max}$ – минимальное и максимальное значения диапазона измерений ИП, при которых результат $\tilde{x}$ измерений находится в пределах установленных границ; y_1 и y_2 – значения результатов контроля, при которых результат измерений $\tilde{x}$ находится за пределами установленных границ $x_{\min}$ и $x_{\max}$ соответственно.

Пример 2

Рассмотрим часть ИС, изображённую на рис. 6 и реализующую измерение количества тепловой энергии методом переменного перепада давления [16].

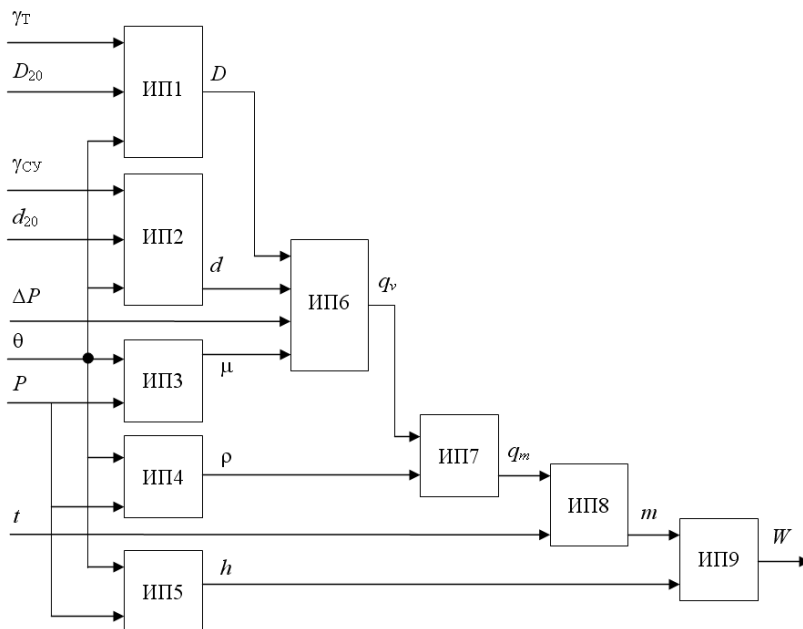


Рис. 6. Структурная схема части ИС, реализующей измерения количества тепловой энергии

Здесь содержится множество ИК.

Во-первых, каналы прямых измерений температуры θ , давления P , разности давлений ΔP , времени t .

Во-вторых, каналы (на рис. 6 не показаны) прямых измерений диаметров измерительного участка трубопровода и сужающего устройства, выполняемых периодически в рабочих условиях применения.

В-третьих, каналы (на рис. 6 также не показаны) косвенных измерений диаметра D_{20} измерительного участка трубопровода и диаметра d_{20} сужающего устройства, приведённых к значению температуры $\theta = 20^\circ\text{C}$. При этом косвенные измерения диаметров осуществляются с использованием температурных коэффициентов γ_T и $\gamma_{су}$ линейного расширения измерительного участка трубопровода и сужающего устройства, значения которых однократно оцениваются исходя из компонентного состава материала измерительного участка трубопровода и материала сужающего устройства.

В-четвёртых, каналы косвенных измерений диаметра D измерительного участка трубопровода (ИП1) и диаметра d сужающего устройства (ИП2) в рабочих условиях применения, вязкости μ (ИП3), плотности ρ (ИП4) и энтальпии h (ИП5) теплоносителя, объёмного q_v (ИП6) и массового q_m (ИП7) расхода теплоносителя, массы m (ИП8) и количества тепловой энергии W (ИП9) теплоносителя.

Очевидно, что нет никакой необходимости в функциональной самостоятельности ряда ИК, например, таких как каналы измерений диаметров измерительного участка трубопровода (ИП1) и d сужающего устройства (ИП2) в рабочих условиях применения, вязкости (ИП3), плотности (ИП4) и энтальпии (ИП5) теплоносителя. Именно поэтому в соответствии с правилами учёта тепловой энергии и теплоносителя [17] достаточно выделить лишь каналы измерений температуры, давления, времени, расхода (ИП6 или ИП7), массы (ИП8) и количества тепловой энергии (ИП9) теплоносителя.

В качестве основного содержания метрологической экспертизы конструкторской, технологической, проектной и эксплуатационной документации ГОСТ Р 8.596 [1] регламентирует **проверку соответствия МХ ИК ИС и их компонентов требованиям технического задания**. При этом проверяются:

- возможность реализации ИК ИС требуемых диапазонов измерений и точности с использованием выбранных компонентов в установленных техническим заданием условиях эксплуатации;
- соответствие МХ ИК ИС и способов их нормирования требованиям технического задания;
- методы подтверждения соответствия МХ ИК ИС, принятых в методике поверки (калибровки), в программе испытаний, в методиках расчета МХ ИК ИС по МХ компонентов;
- реализуемость требований по защите данных и результатов измерений от несанкционированного изменения.

Содержанием метрологической экспертизы документации на программное обеспечение ИС [18] является проверка алгоритмов и программ с точки зрения правильности и рациональности выполнения ими своих функций и специфических требований:

- отсутствие влияния на МХ ИК ИС,
- защищенность измерительной информации от непреднамеренных и преднамеренных воздействий,
- оперативность обработки, передачи и представления информации,
- сведение к минимуму рисков, связанных с применением программного обеспечения в ИС и др.

Другими процедурами подтверждения соответствия МХ ИК ИС установленным нормам, особенности которых подробно рассматриваются в последующих разделах книги, относятся:

- предварительные испытания;
- опытная эксплуатация;
- приёмо-сдаточные испытания;
- испытания для целей утверждения типа и проверки соответствия утверждённому типу;
- метрологическая аттестация программного обеспечения;
- испытания для целей сертификации;
- поверка (первичная и периодическая) и калибровка;
- метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением ИС и т.д.

Первые три процедуры (предварительные испытания, опытная эксплуатация и приёмо-сдаточные испытания) регламентированы ГОСТ 34.603 [19], рассматривающим их как “процесс проверки выполнения заданных функций, определения и проверки соответствия количественных и (или) качественных характеристик системы требованиям технического задания, выявления и устранения недостатков в действиях системы, в разработанной документации”.

Предварительные испытания проводят для определения работоспособности ИС и решения вопроса о возможности приёмки её в опытную эксплуатацию. Предварительные испытания выполняют после проведения разработчиком отладки и тестирования поставляемых программных и технических средств ИС и представления им соответствующих документов о готовности их к испытаниям, а также после ознакомления персонала ИС с эксплуатационной документацией.

Опытную эксплуатацию проводят с целью определения фактических значений количественных и качественных характеристик ИС и готовности персонала к работе в условиях функционирования ИС, определения фактической эффективности ИС, корректировке (при необходимости) документации.

Приемо-сдаточные испытания проводят для определения соответствия ИС требованиям технического задания, оценки качества опытной эксплуатации и решения вопроса о возможности приемки ИС в постоянную эксплуатацию. Приемо-сдаточным испытаниям ИС должна предшествовать ее опытная эксплуатация на объекте.

Испытания для целей утверждения типа [3] проводят для ИС, подлежащих применению в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Если в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений подлежит применению только часть из общего числа ИК ИС, а другая часть – вне этих сфер, то испытаниям для целей утверждения типа ИС подвергают только ИК, подлежащие применению в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Испытания для целей утверждения типа проводят по программам, общие требования к которым изложены в [20]. При испытаниях для целей утверждения типа проверяют соответствие технической документации и технических характеристик ИС требованиям технического задания, а также требованиям технических условий для ИС-1 и рабочей документации для ИС-2.

ИС-1 в отличие от ИС-2 подлежат ещё и **испытаниям для целей проверки соответствия утверждённому типу** в случаях, предусмотренных пунктом 4.2 ПР 50.2.009 [3]:

- при наличии информации от потребителей об ухудшении качества выпускаемых или импортируемых ИС;
- при внесении в их конструкцию или технологию изготовления изменений, влияющих на их нормированные метрологические характеристики;
- при истечении срока действия сертификата об утверждении типа.

Программное обеспечение (ПО), реализуемое вычислительным компонентом ИС, подлежит **метрологической аттестации** в соответствии с [21], в том случае, если оно не подлежало экспериментальной проверке в составе ИК при испытаниях для целей утверждения типа ИС. Кроме характеристик точности ПО должно обладать защищённостью от несанкционированного доступа, а техническая документация на ИС должна содержать описание алгоритма обработки измерительной информации и идентифицирующие признаки реализующей его программы (номер версии, объем программы и т.п.).

В случае модификации программы⁴, новая её версия должна пройти ту же процедуру проверки соответствия (метрологическая аттестация или экспериментальная проверка в составе ИК при испытаниях для целей утверждения типа ИС), что и её предыдущая версия.

Испытания в системах обязательной сертификации ИС и компонентов ИС, подлежащих обязательной сертификации в системе ГОСТ Р или других системах в соответствии с действующим законо-

⁴ Исключение составляют случаи, когда изменения вносятся в ту часть ПО, которая не подлежит метрологическому контролю, при условии разделения ПО на части, подлежащие метрологическому контролю и не подлежащие контролю [22].

дательством, должны предшествовать утверждению типа ИС. Допускается испытания в системах обязательной сертификации ИС и компонентов ИС проводить одновременно с испытаниями с целью утверждения типа.

Поверке подвергают ИС, подлежащие применению в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений. Поверку проводят в соответствии с методикой, утверждённой по результатам испытаний для целей утверждения типа [15]. Требования к методике поверки регламентированы РМГ 51 [23].

Поверке подвергают те ИК, на которые распространён сертификат утверждения типа ИС и которые применяются в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений. Если же в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений применяются только некоторые из общего числа ИК, на которые распространён сертификат утверждения типа ИС, то поверке допускается подвергать только эти ИК. Остальные ИК могут подвергаться калибровке.

В соответствии в ПР 50.2.006 [15] различают:

- первичную поверку при выпуске ИС из производства⁵;
- первичную поверку при выпуске ИС из ремонта;
- первичную поверку при ввозе ИС по импорту;
- периодическую поверку ИС, проводимую по окончании межповерочного интервала, установленного при испытаниях для целей утверждения типа ИС.

По результатам поверки должно быть оформлено свидетельство о поверке ИС по форме приложения 1а ПР 50.2.006 [15] с указанием состава каждого ИК, включающее наименование, тип и заводской номер каждого компонента, или извещение о непригодности ИС (или отдельных её ИК).

Калибровке подвергают ИК ИС, применяемые вне сфер государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Метрологический надзор за ИС осуществляют органы Государственной метрологической службы и метрологические службы юридических лиц в соответствии с Правилами [24] и рекомендациями [25].

⁵ Следует отметить, что в соответствии с пунктом 1.10 ПР 50.2.009 “образцы СИ, предъявленные на испытания для целей утверждения типа, в случае положительных результатов, подлежат поверке в процессе эксплуатации, хранения и после ремонта в соответствии с проверенной в процессе испытаний методикой поверки”. Следовательно, на основании результатов испытаний для целей утверждения типа ИС-2 должно быть оформлено свидетельство о первичной поверке ИС-2 при выпуске из производства.

2.2. Нормируемые метрологические характеристики измерительных каналов ИС

В соответствии с ГОСТ Р 8.596 [1] МХ должны быть регламентированы для каждого ИК ИС. Перечень нормируемых МХ ИК ИС, составленный в соответствии с ГОСТ 8.009 [26] и МИ 2439 [2], приведён в таблице 4.

Следует отметить, что нормирование МХ ИК ИС для ряда групп, таких как характеристики функции преобразования (группа 1), динамические характеристики (группа 4) и характеристики взаимодействия с объектом (группа 5), не отличается от нормирования МХ средств измерений. Нормирование характеристик линии связи (группа 6) также не требует дополнительных комментариев.

Вместе с тем, нормирование таких МХ ИК ИС, как характеристики погрешности (группа 2) и характеристики чувствительности к влияющим величинам (группа 3), обладает некоторыми особенностями и должно проводиться с учётом следующих обстоятельств.

Во-первых, характеристики погрешности с разделением на составляющие (пункт 2.1 таблицы 4) обеспечивают более корректные способы расчета границ погрешности результата измерений, поэтому их регламентация является предпочтительной [2] по сравнению с регламентацией характеристик погрешности без разделения на составляющие (пункт 2.2 таблицы 4). При этом пределы допускаемой погрешности должны представлять “собой границы интервала, в котором значение характеристики любого экземпляра средств измерений данного типа (в данном случае ИК ИС) должно находиться с вероятностью, равной единице” (пункт 3.17 ГОСТ 8.009 [26]), а доверительные границы – с вероятностью, меньшей единицы (равной, например, 0,95).

Во-вторых, характеристики погрешности могут нормироваться для нормальных (так называемые характеристики основной погрешности) или рабочих условий применения⁶ ИК ИС. При этом характеристики погрешности нормируются для рабочих условий применения ИК ИС в тех случаях, когда их наибольшее изменение, вызванное изменениями влияющих величин в пределах рабочих условий применения ИК ИС, меньше нормированного значения характеристик погрешности.

⁶ В соответствии с примечаниями к пунктам 2.2.3 и 2.2.4 МИ 2439 [2] если протяженность ИК такова, что одна и та же влияющая величина для различных его частей может одновременно принимать существенно различающиеся значения, то для различных частей ИК могут устанавливаться различные нормальные и рабочие условия.

Таблица 4 – Перечень нормируемых МХ ИК ИС

№	Метрологическая характеристика	Способы нормирования
1	Характеристики функции преобразования	Номинальная функция преобразования
		Выходной код
		Число разрядов кода
		Номинальная цена единицы наименьшего разряда кода
2	Характеристики погрешности	
2.1	Характеристики погрешности с разделением на составляющие	
2.1.1	Характеристики систематической составляющей погрешности	Пределы (или доверительные границы) допускаемой систематической составляющей погрешности
		Пределы (или доверительные границы) допускаемой систематической составляющей погрешности, математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение систематической составляющей погрешности ⁷
		Пределы (или доверительные границы) допускаемой систематической составляющей погрешности, пределы (или доверительные границы) допускаемого изменения систематической составляющей погрешности за заданный интервал времени
2.1.2	Характеристики случайной составляющей погрешности	Предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности
		Предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности, номинальная нормализованная (выраженная в долях дисперсии) автокорреляционная функция случайной составляющей погрешности ИК ИС и предел допускаемого отклонения от неё
		Предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности, номинальная спектральная плотность случайной составляющей погрешности ИК ИС и предел допускаемого отклонения от неё
		Предел допускаемой вариации выходного аналогового сигнала ИК или показаний цифрового сигнала ИК

⁷ Здесь систематическая составляющая погрешности рассматривается как случайная величина на множестве ИК ИС данного типа, а её характеристики (математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение) могут использоваться изготовителем, например, для оценки качества технологического процесса изготовления ИС.

Продолжение таблицы 4 – Перечень нормируемых МХ ИК ИС

№	Метрологическая характеристика	Способы нормирования
2.2	Характеристики погрешности без разделения на составляющие	Пределы (или доверительные границы) допускаемой погрешности
		Пределы (или доверительные границы) допускаемой погрешности, математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение погрешности
		Пределы (или доверительные границы) допускаемой погрешности, пределы (или доверительные границы) допускаемого изменения погрешности за заданный интервал времени
3	Характеристики чувствительности к влияющим величинам	Номинальная функция влияния и пределы (доверительные границы) допускаемых отклонений от неё
		Пределы допускаемых изменений МХ ИК ИС, вызванные отклонением внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала от номинальных значений
		Динамические характеристики влияния, например: а) номинальная функция связи между изменяющимися во времени влияющей величиной и выходным сигналом ИК ИС и предел допускаемого отклонения от неё; б) время установления показаний или выходного сигнала ИК ИС при заданном характере изменения влияющей величины во времени.
4	Динамические характеристики	
4.1	Полные динамические характеристики	Переходная характеристика
		Импульсная переходная характеристика
		Амплитудно-фазовая характеристика
		Совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик
		Передаточная функция
4.2	Частные динамические характеристики	Время измерений (или установления выходного сигнала) ИК ИС
		Время задержки выдачи результата
		Погрешность датирования отсчёта
		Максимальная частота (скорость) измерений
5	Характеристики взаимодействия с объектом измерений	Входной и/или выходной импеданс ИК ИС
6	Характеристики линии связи	Параметры линии связи, при которых гарантируются МХ ИК ИС
		Параметры линии связи, позволяющие учесть их влияние на МХ ИК ИС

В-третьих, в соответствии с п. 1.6 МИ 2439 [2] регламентация МХ ИК ИС не исключает нормирование МХ компонентов ИК ИС, обеспечивающее не только соответствие МХ ИК регламентированным, но и взаимозаменяемость компонентов.

Кроме нормирования МХ измерительных компонентов ИК ГОСТ Р 8.596 [1] предусматривает также нормирование МХ вычислительных компонентов ИК. При этом отдельное нормирование МХ вычислительных компонентов ИК рекомендуется проводить лишь в том случае, если их свойства не учтены при нормировании МХ совокупности измерительных и вычислительных компонентов, образующих ИК.

При установлении норм на МХ ИК ИС следует помнить, что они применяются не только для сравнения точности ИС между собой и для расчета границ погрешности результатов измерений, выполняемых посредством ИК в рабочих условиях эксплуатации, но и для осуществления контроля при испытаниях и поверке ИС на соответствие установленным нормам. Именно поэтому “если экспериментальное определение (контроль) МХ ИК в целом не может быть обеспечено, то МХ нормируют для таких частей ИК, для которых такое определение возможно” (примечание к пункту 5.2 ГОСТ Р 8.596 [1]).

Обобщая, можно классифицировать варианты нормирования МХ ИК ИС (рис. 7) на следующие классы:

- а) нормирование МХ ИК в целом с нормированием МХ компонентов или без такового;
- б) нормирование МХ ИК в рабочих условиях с нормированием МХ в нормальных условиях или без такового;
- в) нормирование характеристик погрешности ИК с разделением на составляющие или без такового.

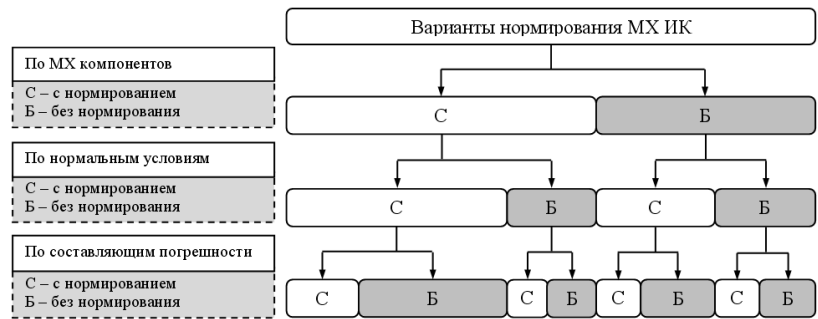


Рис. 7. Классификация вариантов нормирования МХ ИК ИС

По мнению автора, наиболее распространённым вариантом является нормирование МХ ИК в целом

а) с нормированием МХ компонентов (что объяснимо, т.к. измерительные компоненты ИК ИС обычно являются средствами измерений с нормированными МХ);

б) с нормированием МХ в нормальных условиях (необходимых для передачи размера единиц физических величин);

в) без разделения характеристик погрешности на составляющие.

Таким образом, нормирование МХ ИК является “сложной многовариантной задачей” [2]. Выбор того или иного варианта нормирования определяется упомянутыми ранее классификационными признаками ИС (пункт 1.2, рис. 2), классификационными признаками ИК (пункт 1.3, рис. 4), а также методами подтверждения МХ ИК ИС установленным нормам, рассматриваемыми далее в пункте 2.4.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос нормирования характеристик погрешности сложных ИК, реализующих косвенные (а также совокупные или совместные) измерения. При таких измерениях один и тот же результат косвенных (совокупных или совместных) измерений может быть получен при различных сочетаниях результатов прямых измерений простых ИК (обычно недоступных пользователю), образующих сложный ИК, что представляет некоторые затруднения в нормировании характеристик погрешности сложных ИК ИС. Более того, по мнению Новицкого П.В. [7], “погрешности результатов косвенных измерений, выполняемых ИК ИС, не могут быть заранее нормированы”.

В качестве одного из способов разрешения этого противоречия ГОСТ 26.203 [27] рекомендует вместе с результатом косвенных измерений выводить и погрешность полученного результата. Однако на сегодняшний день эта справедливая рекомендация не реализована в известных автору измерительно-вычислительных комплексах и ИС.

Поэтому приходится использовать иные варианты нормирования характеристик погрешности сложных ИК ИС, такие как пределы [26] или доверительные границы [28] допускаемой погрешности.

В соответствии с ГОСТ 8.009 [26] пределы допускаемой погрешности должны быть регламентированы с вероятностью, равной единице. Следовательно, для нахождения пределов допускаемой погрешности сложных ИК необходимо выполнить весовое суммирование модулей пределов допускаемой погрешности простых ИК, образующих сложный ИК. Разумеется, такой способ нормирования характеристик погрешности сопровождается чрезмерным запасом, т.к. вероятность одновременного достижения погрешностями простых ИК своих преде-

лов чрезвычайно мала. Поэтому для нормирования характеристик погрешности сложных ИК применение пределов допускаемой погрешности нецелесообразно.

Расчёт доверительных границ погрешности результатов косвенных (совокупных или совместных) измерений при известных промежуточных результатах прямых измерений может быть выполнен с использованием известных рекомендаций [29]. Однако, как отмечено выше, результаты прямых измерений в ИС обычно недоступны пользователю. Поэтому, при получении результата измерений (с помощью сложного ИК) нельзя однозначно утверждать, при каком сочетании результатов прямых измерений (выполняемых с помощью простых ИК) он получен. Следовательно, для каждого сочетания результатов прямых измерений могут быть рассчитаны доверительные границы погрешности результата косвенных (совокупных или совместных) измерений (при заданной доверительной вероятности), а из полученного множества выбрано максимальное значение. Однако полученное в результате максимальное значение доверительных границ погрешности также сопровождается чрезмерным запасом по той же причине – вероятность одновременного достижения погрешностями простых ИК своих границ чрезвычайно мала.

В качестве альтернативы рассмотренным характеристикам погрешности, обладающим чрезвычайным запасом, могут быть регламентированы нормы *средневзвешенной* погрешности, которые предложено [8] получать усреднением границ погрешности результата измерений сложного ИК для всех возможных сочетаний результатов прямых измерений простых ИК, образующих сложный ИК. В соответствии с принятой формулировкой средневзвешенная погрешность есть ни что иное, как математическое ожидание границ погрешности результата измерений сложного ИК. Разумеется, вместе с математическим ожиданием целесообразно регламентировать и среднее квадратическое отклонение (СКО) границ погрешности сложного ИК.

Следует отметить, что регламентация математического ожидания и СКО доверительных границ погрешности пока не получила должного распространения, хотя в некоторых нормативных документах всё же встречаются аналоги средневзвешенной погрешности.

Так, ГОСТ 8.156 [30] вводит понятие среднеинтегральной погрешности, определяемой по результатам измерений в пяти точках диапазона измерений счётчика жидкости: при номинальном, переходном и минимальном расходах, а также в точках диапазона измерений, соответствующих 20 и 50 % от номинального расхода.

Пример 3

При косвенных измерениях сопротивления, реализуемых посредством сложного ИК, один и тот же результат измерений может быть получен при различных сочетаниях результатов измерений напряжения и тока.

Предположим, что ИК напряжения обладает диапазоном измерений от 1 до 10 В, а ИК тока – от 1 до 10 мА. Также предположим, что пределы допускаемой относительной погрешности ИК напряжения и ИК тока регламентированы соответственно следующими двучленными формулами:

$$\delta_U = \pm \left[c_U + d_U \left(\frac{U_K}{U} - 1 \right) \right], \quad \delta_I = \pm \left[c_I + d_I \left(\frac{I_K}{I} - 1 \right) \right],$$

где U_K и I_K – конечные значения диапазонов измерений ИК напряжения и ИК тока соответственно, U и I – результаты измерений напряжения и тока соответственно.

Следовательно, с использованием указанных ИК один и тот же результат измерений сопротивления 1 кОм может быть получен при различных сочетаниях результатов измерений напряжения и тока: 1 В и 1 мА, 10 В и 10 мА и др.

Вычислим пределы допускаемой погрешности, доверительные границы, математическое ожидание и СКО доверительных границ погрешности.

Пределы допускаемой относительной погрешности сложного ИК, рассматриваемого в примере, могут быть рассчитаны по формуле:

$$\delta_{Rnp} = \pm (|\delta_U| + |\delta_I|).$$

При нахождении пределов допускаемой погрешности будем исходить из того, что пределы допускаемой погрешности сложного ИК при получении результата измерений сопротивления будут различными для различных сочетаний результатов прямых измерений, выполняемых с помощью простых ИК.

Так, при получении результата измерений напряжения 10 В пределы допускаемой относительной погрешности измерений напряжения составляют всего лишь $\pm c_U$, в то время как при получении результата измерений напряжения 1 В – уже $\pm(c_U + 9d_U)$. То же самое можно сказать и про пределы допускаемой относительной погрешности измерений тока.

Следовательно, при получении одного и того же результата измерений сопротивления 1 кОм пределы допускаемой относительной погрешности сложного ИК будут различными для различных сочетаний результатов прямых измерений, выполняемых с помощью простых ИК, – минимальны для сочетания 10 В и 10 мА и максимальны для сочетания 1 В и 1 мА соответственно:

$$\delta_{Rnp \min} = \pm (|c_U| + |c_I|), \quad \delta_{Rnp \max} = \pm (|c_U + 9d_U| + |c_I + 9d_I|).$$

Предполагая (для простоты), что $c_U = c_I$, $d_U = d_I$, получим:

$$\delta_{Rnp \min} = \pm 2|c_U|, \quad \delta_{Rnp \max} = \pm 2|c_U + 9d_U|.$$

Например, при $c_U = 0,02$, $d_U = 0,01$, получим

$$\delta_{Rnp \min} = \pm 0,04\%, \quad \delta_{Rnp \max} = \pm 0,22\%.$$

Следовательно, при получении результатов прямых измерений напряжения (10 В) и тока (10 мА), будет получен результат косвенного измерений сопротивления 1 кОм, пределы допускаемой погрешности которого должны быть $\pm 0,04\%$, но будут регламентированы $\pm 0,22\%$, т.е. в 5,5 раз больше!

Доверительные границы допускаемой относительной погрешности сложного ИК, рассматриваемого в примере, при отсутствии корреляции между погрешностями ИК напряжения и ИК тока, распределёнными по равномерному закону, могут быть рассчитаны по формуле:

$$\delta_{Rrp} = \pm k \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2}.$$

Для двух предельных случаев (10 В и 10 мА; 1 В и 1 мА) получения одного и того же результата измерений сопротивления 1 кОм соответственно получим минимальное и максимальное значения доверительных границ погрешности:

$$\delta_{Rrp\min} = \pm k \sqrt{(c_U)^2 + (c_I)^2}, \quad \delta_{Rrp\max} = \pm k \sqrt{(c_U + 9d_U)^2 + (c_I + 9d_I)^2},$$

где k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью.

Ранее принято, что $c_U = c_I$, $d_U = d_I$. Следовательно:

$$\delta_{Rrp\min} = \pm k \sqrt{2} c_U, \quad \delta_{Rrp\max} = \pm k \sqrt{2} (c_U + 9d_U),$$

что при подстановке числовых значений $c_U = 0,02$, $d_U = 0,01$ даёт:

$$\delta_{Rrp\min} = \pm k \sqrt{2} \times 0,02 = \pm 0,03 \times k\%, \quad \delta_{Rrp\max} = \pm k \sqrt{2} \times 0,11 = \pm 0,16 \times k\%,$$

т.е., как и при нормировании предела допускаемой погрешности может okazaться, что максимальное значение доверительных границ погрешности полученного результата измерений (1 кОм) может быть в 5,5 раз меньше минимального значения доверительных границ погрешности.

Математическое ожидание и СКО доверительных границ относительной погрешности могут быть рассчитаны соответственно по формулам⁸:

$$m_\delta = \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} |\delta_R(U)| p_R(U) dU, \quad S_\delta = \sqrt{\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} (|\delta_R(U)| - m_\delta)^2 p_R(U) dU},$$

где $\delta_R(U)$ и $p_R(U)$ – соответственно доверительные границы относительной погрешности результата измерений сопротивления R и вероятность его получения как функции от результата измерений напряжения, $U_{\min}$ и $U_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения ИК напряжения, при которых возможно получение результата измерений сопротивления R .

⁸ Разумеется, для практического применения могут использоваться упрощенные формулы, получаемые заменой интегрирования суммированием нескольких значений подынтегральных функций при значениях аргумента, расположенных, например, равномерно в диапазоне от $U_{\min}$ до $U_{\max}$.

Предполагая равновероятный характер появления результата измерений сопротивления R , т.е.

$$p_R(U) = \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}},$$

запишем

$$m_\delta = \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} |\delta_R(U)| dU, \quad S_\delta = \sqrt{\frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} (|\delta_R(U)| - m_\delta)^2 dU}.$$

Функция $\delta_R(U)$ может быть получена путём подстановки двучленных формул δ_U и δ_I в формулу

$$\delta_R(U) = \pm k \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2} = \pm k \sqrt{\left[c_U + d_U \left(\frac{U_K}{U} - 1 \right) \right]^2 + \left[c_I + d_I \left(\frac{I_K}{I} - 1 \right) \right]^2}.$$

Заменив I на U/R в выражении для δ_I , получим:

$$\delta_R(U) = \pm k \sqrt{\left[c_U + d_U \left(\frac{U_K}{U} - 1 \right) \right]^2 + \left[c_I + d_I \left(\frac{RI_K}{U} - 1 \right) \right]^2}.$$

Учитывая, что $RI_K = U_K$, и предполагая, что $c_U = c_I$, $d_U = d_I$, после преобразований получим:

$$\delta_R(U) = \pm k \sqrt{2} \left[c_U + d_U \left(\frac{U_K}{U} - 1 \right) \right] = \pm k \sqrt{2} \delta_U.$$

Подставляя $\delta_R(U)$ в формулы для m_δ и S_δ , получим:

$$m_\delta = k \sqrt{2} \left[(c_U - d_U) + \frac{d_U U_K}{U_{\max} - U_{\min}} \ln \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right].$$

$$S_\delta = k \sqrt{2} d_U U_K \sqrt{\frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}} \ln \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right)^2 dU},$$

что при подстановке тех же числовых значений $c_U = 0,02$, $d_U = 0,01$, даёт:

$$m_\delta = 0,05 \times k \%, \quad S_\delta = 0,026 \times k \%.$$

Таким образом, для сложного ИК в рассматриваемом примере в качестве норм на характеристики погрешности могут быть установлены:

- пределы допускаемой относительной погрешности $\delta_{\text{нр max}} = \pm 0,22 \%$;
- доверительные границы допускаемой относительной погрешности $\delta_{\text{нр max}} = \pm 0,16 \times k \%$;
- математическое ожидание $m_\delta = 0,05 \times k \%$ и СКО $S_\delta = 0,026 \times k \%$ доверительных границ относительной погрешности.

2.3. Методы подтверждения соответствия метрологических характеристик измерительных каналов ИС установленным нормам

Методы подтверждения соответствия МХ ИК ИС установленным нормам могут быть классифицированы по трём признакам (рис. 8), заимствованным из МИ 2439 [2].

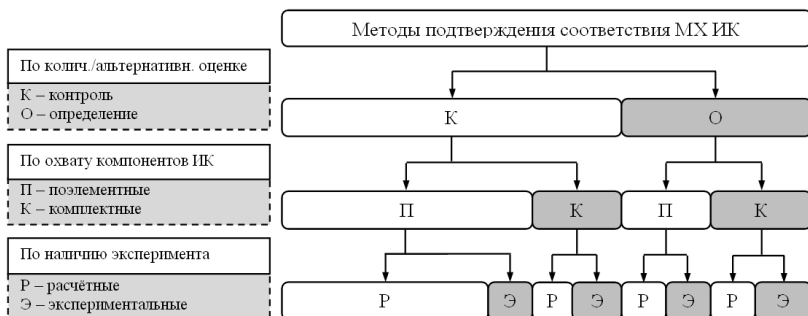


Рис. 8. Классификация методов подтверждения соответствия МХ ИК ИС установленным нормам

Наиболее существенным признаком классификации является оценка (количественная или альтернативная) соответствия МХ ИК ИС установленным нормам, в соответствии с которым методы подразделяются на: методы контроля МХ и методы определения МХ. Типичными представителями этих методов являются поверка (определение пригодности ИК к применению) и калибровка (определение действительных значений МХ ИК ИС) соответственно.

Второй классификационный признак – охват компонентов ИК в экспериментальной проверке – подразделяет методы на два класса: методы с поэлементной и методы с комплектной проверкой соответствия МХ ИК ИС установленным нормам. В первом случае проводится проверка соответствия каждого в отдельности компонента ИК установленным для него требованиям, а во втором – проверка соответствия ИК или той его части, для которой может быть реализована экспериментальная проверка.

Третий классификационный признак – наличие экспериментальных исследований – подразделяет методы на два класса: расчётные и экспериментальные.

2.3.1. Экспериментальные методы

Основные принципы экспериментальных методов изложены в МИ 2439 [2], а особенности их реализации для подтверждения соответствия МХ простых ИК – в МИ 2440 [31].

Для реализации экспериментальных методов необходимо [2]:

- наличие доступа к входу ИК⁹ (должно быть предусмотрено в техническом задании на разработку ИС и проверено при проведении метрологической экспертизы документации на ИС);
- наличие эталонов и средств задания измеряемых величин;
- возможность задания необходимого набора значений влияющих величин, существенных для испытаний и характерных для условий эксплуатации ИС.

При реализации экспериментальных исследований целесообразно выполнение следующих операций:

- внешний осмотр (включая проверку качества монтажа и соблюдения требований к параметрам линии связи, оказывающим влияние на МХ ИК);
- проверка функционирования (включая проверку взаимного влияния ИК – результаты измерений ИК не должны зависеть от результатов измерений других ИК);
- проверка условий эксплуатации компонентов ИК (включая проверку не только диапазона изменения влияющих величин, но и требований к характеристикам взаимодействия с другими компонентами – например, проверку нагрузки вторичных цепей измерительных трансформаторов напряжения и трансформаторов тока при проведении поверки АИИС КУЭ [32]);
- проверка МХ ИК;
- проверка целостности программного обеспечения;
- проверка отсутствия ошибок информационного обмена и т.д.

Следует отметить, что требования к *условиям эксперимента* могут существенно отличаться для методов контроля и методов определения.

Так, при контроле (в частности, при поверке) ИС должны соблюдаться так называемые нормальные условия эксплуатации, “характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости” [33]. Поэтому одна из важнейших операций поверки – передача размера единиц величин от эталонов поверяемому ИК ИС – должна осуществляться именно в нормальных условиях.

⁹ Ограничение доступа к входу ИК может быть обусловлено конструктивными особенностями датчиков и способами их установки, температурными условиями и т.п.

К особенностям контрольных операций следует отнести введение контрольных допусков (называемых также коэффициентами метрологического запаса) – для обеспечения требуемой достоверности поверки [34, 35]. При этом поверяемый ИК признаётся пригодным к применению лишь в том случае, если при проверке основной погрешности, её значения не превысят допускаемых границ:

$$\Delta_{\text{доп}} = \pm k \times |\Delta_{\text{осн}}|,$$

где $\Delta_{\text{осн}}$ – пределы допускаемой основной погрешности, регламентированные для поверяемого ИК ИС; k – коэффициент, определяющий контрольный допуск и зависящий от требований к достоверности поверки и соотношения между пределами погрешности эталона и поверяемого ИК ИС, $k \leq 1$.

Вместе с тем при эксплуатации ИС могут возникнуть такие ситуации, когда обеспечить нормальные условия для поверки ИС невозможно, а провести проверку соответствия МХ ИК ИС установленным нормам необходимо. При такой постановке вопроса речь может идти не о поверке (в обычном её понимании), а лишь о возможности переноса результатов проверки погрешности ИК ИС, выполненного в фактических условиях эксплуатации, на нормальные условия. Некоторое обоснование таких действий приведено в [36]. При этом значение коэффициента k , определяющего контрольный допуск, для достижения той же достоверности результатов проверки погрешности должно быть уменьшено в связи с расширением диапазона изменений влияющих величин и возможным увеличением погрешности эталонов (в условиях эксплуатации, сложившихся на момент поверки ИС).

Следует помнить, что с уменьшением коэффициента k увеличивается вероятность признания негодными в действительности пригодных к применению ИК ИС. Именно поэтому контроль ИК ИС целесообразно проводить лишь при незначительном отклонении условий контроля от нормальных. В противном случае придётся:

- либо уменьшить коэффициент k до таких значений, что практически все контролируемые ИК ИС будут признаваться негодными,
- либо уменьшить значения достоверности контроля, т.е. увеличить вероятность признания годными в действительности непригодных к применению ИК ИС, что, разумеется, недопустимо.

В отличие от контроля определение МХ (в частности, при калибровке) ИК ИС может осуществляться в конкретно сложившихся условиях применения ИС, в том числе существенно отличающихся от нормальных [2]. При этом полученные в процессе экспериментальных значения МХ сравниваются с расчетными значениями тех же характеристик, вычисленными для конкретно сложившихся условий по нор-

мированным или определенным в результате эксперимента МХ компонентов, входящих в состав ИК.

В частности, при определении границ погрешности в качестве допускаемых границ $\Delta_{\text{доп}}$ (при определении пригодности ИК ИС к применению – как одной из возможных задач калибровки) могут быть использованы значения, вычисленные с учётом результатов измерений влияющих величин, сложившихся на момент проведения эксперимента, по формуле (при отсутствии корреляции между ними):

$$\Delta_{\text{доп}} = \pm k \times \left| \Delta_{\text{осн}} + \sum_{i=1}^n \alpha_i (\xi_i - \xi_{i\text{норм гр}}) \right|,$$

где α_i – коэффициент влияния i -й влияющей величины, регламентированный для ИК ИС; ξ_i – результат измерений i -й влияющей величины; $\xi_{i\text{норм гр}}$ – ближайшее к результату измерений ξ_i граничное (минимальное или максимальное) значение нормальных условий эксплуатации, регламентированное для ИК ИС; n – количество влияющих величин, регламентированных в качестве условий эксплуатации ИК ИС.

При разработке программ экспериментальных исследований (испытаний, поверки, калибровки и т.д.) встаёт вопрос о назначении количества проверяемых точек в диапазоне измерений ИК и количества измерений в проверяемой точке диапазона измерений ИК.

В соответствии с рекомендациями, приведёнными в приложении 2 МИ 2440 [31], для ИК с линейной номинальной функцией преобразования **количество проверяемых точек** в диапазоне измерений ИК выбирается следующим образом:

- если нулевое значение измеряемой величины расположено в середине диапазона измерений ИК, то число проверяемых точек принимается равным 11 (по пять точек на положительной и отрицательной частях диапазона измерений и одна точка вблизи нулевого значения);
- если нулевое значение измеряемой величины расположено на краю диапазона измерений ИК, то число проверяемых точек принимается равным 5.

В случае ИК с нелинейной номинальной функцией преобразования количество проверяемых точек в диапазоне измерений ИК выбирается не менее, указанного выше, а их расположение может быть неравномерным. При этом в число проверяемых включают точки, в которых ожидаются наибольшие значения характеристик погрешности, а также точки, соответствующие нижнему и верхнему пределам диапазона измерений.

Рекомендуемое *количество измерений в проверяемой точке* диапазона измерений ИК приведено в таблице 5, составленной на основе МИ 2440 [31], и зависит от априорных сведений о существенности случайной составляющей погрешности и вариации.

Таблица 5 – Рекомендуемое количество измерений в точке диапазона измерений ИК

Составляющие погрешности:		Рекомендуемое количество измерений
случайная	вариация	
Не существенна	Не существенна	1
Не существенна	Существенна	2
Существенна	Не существенна	8-10
Существенна	Существенна	16-20
При наличии вариации эксперимент осуществляют дважды: сначала при подходе к проверяемой точке диапазона измерений ИК со стороны меньших, а затем – со стороны больших значений (или наоборот).		

При отсутствии априорных сведений о существенности составляющих погрешности целесообразно провести исследование составляющих погрешности ИК в соответствии с рекомендациями пункта 2.7 МИ 2440 [31]. Такое исследование может быть проведено на этапах предварительных исследований или опытной эксплуатации ИС и позволит (в случае несущественности составляющих) снизить продолжительность и затраты на контрольные операции при проведении экспериментальных исследований в рамках приёмо-сдаточных испытаний, испытаний для целей утверждения типа и проверки соответствия утверждённому типу, поверке и калибровке.

Для *сложных ИК комплектные методы* экспериментального подтверждения соответствия МХ установленным нормам пока не регламентированы нормативными документами.

Для проверки сложных ИК может использоваться подход, основанный на имитации выходных сигналов первичных измерительных преобразователей (ПИП). Вместо ПИП, МХ которых проверяются отдельно, подключаются эталоны, т.е. реализуется “частично комплектная” проверка МХ ИК ИС. При этом в каждой проверяемой точке с помощью эталона поочерёдно имитируется как минимальное $x_{\min} = x_{\text{ном}} - \Delta$, так и максимальное $x_{\max} = x_{\text{ном}} + \Delta$ значения выходного сигнала каждого ПИП, где $x_{\text{ном}}$ – номинальное значение выходного сигнала ПИП, Δ – пределы допускаемой погрешности ПИП. Учитывая, что в сложном ИК используется несколько ПИП, то для каждой из возможных комбинаций минимальных и максимальных значений эталонов определяют погрешность ИК. За оценку погрешности ИК в проверяемой точке принимают максимальное из полученных значений.

Пример 4

Предположим, что сложный ИК, схема которого изображена на рис. 9, состоит из первичных измерительных преобразователей (ПИП1 и ПИП2), измерительных преобразователей (ИП1 и ИП2) и вычислительного компонента ВК.

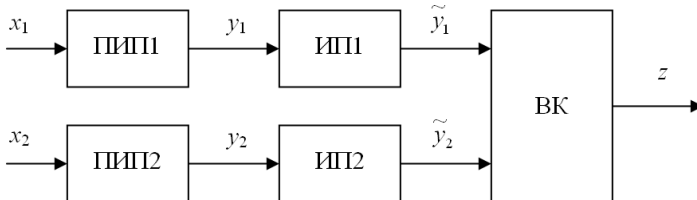


Рис. 9. Структурная схема сложного ИК

Такой ИК реализует метод косвенных измерений физической величины z в соответствии с функциональной зависимостью

$$z = f(x_1, x_2),$$

где $f(x_1, x_2)$ – функция преобразования, реализуемая сложным ИК, x_1, x_2 – аргументы функции преобразования.

В соответствии с рассматриваемым подходом проверка МХ ПИП1 и ПИП2 проводится отдельно. Проверка оставшейся части ИК проводится комплектно (точнее, “частично комплектно”) – вместо ПИП1 и ПИП2 подключаются эталоны, с помощью которых проводится экспериментальное определение погрешности сложного ИК. Для этого в каждой из проверяемых точек, регламентированных совокупностью номинальных значений $y_{1ном}, y_{2ном}$ выходных сигналов ПИП1 и ПИП2, с помощью эталонов формируются все возможные комбинации выходных сигналов ПИП 1 и ПИП2 с учётом пределов Δ_1 и Δ_2 погрешности. Соответствующие значения четырёх возможных комбинаций сигналов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Комплектная проверка погрешности сложного ИК

№	y_1	y_2	$\varepsilon_z = f(y_1, y_2) - f(y_{1\text{HOM}}, y_{2\text{HOM}})$	$\Delta_z(y_{1\text{HOM}}, y_{2\text{HOM}})$
1	$y_{1\min}$	$y_{2\min}$	$\varepsilon_1 = f(y_{1\min}, y_{2\min}) - f(y_{1\text{HOM}}, y_{2\text{HOM}})$	$\pm \max\{ \varepsilon_1 , \varepsilon_2 , \varepsilon_3 , \varepsilon_4 \}$
2	$y_{1\min}$	$y_{2\max}$	$\varepsilon_2 = f(y_{1\min}, y_{2\max}) - f(y_{1\text{HOM}}, y_{2\text{HOM}})$	
3	$y_{1\max}$	$y_{2\min}$	$\varepsilon_3 = f(y_{1\max}, y_{2\min}) - f(y_{1\text{HOM}}, y_{2\text{HOM}})$	
4	$y_{1\max}$	$y_{2\max}$	$\varepsilon_4 = f(y_{1\max}, y_{2\max}) - f(y_{1\text{HOM}}, y_{2\text{HOM}})$	
где $y_{1\min} = y_{1\text{HOM}} - \Delta_1$; $y_{1\max} = y_{1\text{HOM}} + \Delta_1$; $y_{2\min} = y_{2\text{HOM}} - \Delta_2$; $y_{2\max} = y_{2\text{HOM}} + \Delta_2$				

В качестве границ погрешности в проверяемой точке принимаются

$$\Delta_z(y_{1ном}, y_{2ном}) = \pm \max\{|\varepsilon_1|, |\varepsilon_2|, |\varepsilon_3|, |\varepsilon_4|\}.$$

2.3.2. Расчётные методы

Методы расчета МХ ИК ИС могут быть использованы как при проектной оценке МХ ИК ИС на стадии создания, так и на этапе ввода ИС в эксплуатацию.

Необходимость применения расчётных методов определения погрешности ИК ИС обусловлена особенностями ИС, не позволяющими применить к ним традиционные методы проверки соответствия МХ ИК ИС установленным нормам.

Расчётные методы требуют априорной информации, такой как сведения о структуре и законах распределения погрешностей, входных и выходных импедансах, характеристиках линий связи и других компонентах ИК, не относящихся к средствам измерений, характеристиках алгоритма [37]. Эта информация может отсутствовать, быть неполной и недостоверной. В этом случае исходные данные для расчёта формируют на основе предположений, некоторые из них приведены в РМГ 62 [38].

При расчётах оперируют с числовыми значениями величин и их погрешностями, в большинстве случаев приближёнными. Следовательно, в исходных данных для расчёта уже содержатся погрешности, которые могут увеличиваться за счёт погрешностей процедур вычислений (алгоритма вычислений), таких как округление, аппроксимация, линеаризация, статистическая обработка данных вследствие ограниченного количества исходных данных [37].

Для расчёта МХ ИК по МХ компонентов могут применяться:

- нормированные значения МХ, приведённые в документации;
- значения МХ, полученные в результате эксперимента.

Для расчёта МХ простых ИК с номинальной линейной функцией преобразования ИП в настоящее время существует две рекомендации – МИ 222 [39] и МИ 2168 [40]. Однако “эти документы, математически строго решающие задачу расчёта для принятых в них моделей ИК, ориентированы на исходную информацию о компонентах ИС, которая обычно не сообщается изготовителем, что делает их малопригодными в инженерной практике” [41]. Некоторые предложения по упрощению методики расчёта приведены в [37].

Для расчёта МХ простых ИК с номинальной нелинейной функцией преобразования ИП, а также МХ сложных ИК подобные общие рекомендации отсутствуют. Вместе с тем, расчёт некоторых характеристик погрешности некоторых сложных ИК может быть проведён с использованием соответствующих разделов методик выполнения измерений, например, с использованием раздела 10 ГОСТ 8.586.5 [16], раздела 9 РД 153-34.0-11.209-99 [42].

Пример 5

Рассмотрим один из простых ИК, состоящий из трёх преобразователей: ПИП, ИП и ВК (рис. 10). При этом ИП и ВК обычно представляют собой один из каналов измерительно-вычислительного комплекса (ИВК).

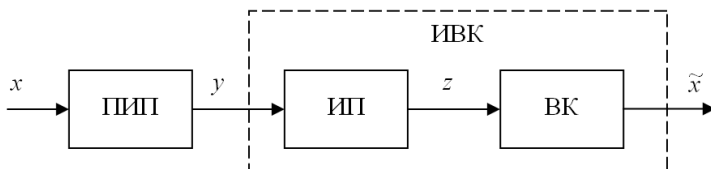


Рис. 10. Структурная схема простого ИК

Для расчёта МХ такого ИК могут быть использованы упомянутые рекомендации [39, 40] в том случае, если ПИП, ИП и ВК обладают номинальными линейными функциями преобразования. Типичным представителем такого ИК является, например, ИК давления при условии, что в качестве ПИП используется датчик давления с токовым выходным сигналом, а в качестве ИП – преобразователь тока в цифровой код. При этом в вычислительном компоненте реализуется преобразование кода тока в код давления с отображением результата измерений давления на мониторе.

Следует помнить, что на случай расчёта МХ ИК, в состав которого входят ИП с номинальной нелинейной функцией преобразования, МИ 222 [39] и МИ 2168 [40] не распространяются. Типичным представителем ИК такого типа является, например, ИК температуры, в состав которого входят два компонента, обладающие номинальной нелинейной функцией преобразования: термопара (в качестве ПИП) и ВК.

Для расчёта характеристик погрешности ИК в общем случае может быть принят подход, известный из теории измерений [43, 44], заимствованный в [37] и заключающийся в следующем.

В ИК последовательной структуры (рис. 10) наличие погрешности предыдущих компонентов ИК может привести к изменению значения входного сигнала последующих компонентов ИК, а, следовательно, к погрешности ИК. В общем случае расчёт характеристик погрешности ИК последовательной структуры заключается в последовательном приведении погрешности компонентов к выходу ИК.

Так, для ИК последовательной структуры, приведённой на рис. 10, функции преобразования ПИП, ИП и ВК могут быть представлены в виде:

$$y = y(x), \quad z = z(y), \quad \tilde{x} = \tilde{x}(z).$$

Проведя последовательные преобразования, функция преобразования ИК может быть представлена в виде:

$$\tilde{x} = \tilde{x}\{z[y(x)]\}.$$

При этом номинальная функция преобразования ИК обычно имеет вид: $\tilde{x} = x$.

Предположим, что ПИП и ВК обладают номинальными нелинейными функциями преобразования, каждая из которых представлена степенным полиномом:

$$y_{\text{ном}} = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad \tilde{x}_{\text{ном}} = \sum_{k=0}^m c_k z^k,$$

а ИП – номинальной линейной функцией преобразования:

$$z_{\text{ном}} = b_0 + b_1 y,$$

где a_i , b_j , c_k – коэффициенты полиномов.

Также предположим, что пределы допускаемой абсолютной погрешности ПИП, ИП и ВК приведены к входу соответствующего компонента. Обозначим их $\Delta_{\text{ПИП}}$, $\Delta_{\text{ИП}}$ и $\Delta_{\text{ВК}}$ соответственно.

Определим пределы и доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности результата измерений.

При принятых предположениях

$$y = \sum_{i=0}^n a_i (x + \Delta_{\text{ПИП}})^i.$$

Раскрыв скобки, сгруппировав слагаемые по степеням $\Delta_{\text{ПИП}}$ и пренебрегая погрешностями второго порядка малости, т.е. слагаемыми, содержащими $\Delta_{\text{ПИП}}$ во второй и более высокой степени, получим:

$$y \approx \sum_{i=0}^n a_i x^i + \Delta_{\text{ПИП}} \times \sum_{i=0}^n a_i (i-1) x^{i-1} = y_{\text{ном}} + A \Delta_{\text{ПИП}},$$

где $A = \sum_{i=0}^n a_i (i-1) x^{i-1}$ – коэффициент преобразования погрешности ПИП.

Подставив полученное выражение для y в выражение для

$$z = b_0 + b_1 (y + \Delta_{\text{ИП}}),$$

после преобразований получим:

$$z = b_0 + b_1 y_{\text{ном}} + b_1 (A \Delta_{\text{ПИП}} + \Delta_{\text{ИП}})$$

или

$$z = z_{\text{ном}} + b_1 (A \Delta_{\text{ПИП}} + \Delta_{\text{ИП}}) = z_{\text{ном}} + A B \Delta_{\text{ПИП}} + B \Delta_{\text{ИП}},$$

где $B = b_1$ – коэффициент преобразования погрешности ИП.

Подставив полученное выражение для z в выражение для

$$\tilde{x} = \sum_{k=0}^m c_k (z + \Delta_{\text{ВК}})^k ,$$

после преобразований получим:

$$\tilde{x} \approx \sum_{k=0}^m c_k z_{\text{НОМ}}^k + (AB\Delta_{\text{ПИП}} + B\Delta_{\text{ИП}} + \Delta_{\text{ВК}}) \times \sum_{k=0}^m c_k (k-1) z_{\text{НОМ}}^{k-1}$$

или

$$\tilde{x} \approx \sum_{k=0}^m c_k z_{\text{НОМ}}^k + (AB\Delta_{\text{ПИП}} + B\Delta_{\text{ИП}} + \Delta_{\text{ВК}})C ,$$

где $C = \sum_{k=0}^m c_k (k-1) z_{\text{НОМ}}^{k-1}$ – коэффициент преобразования погрешности ВК.

Отсюда пределы допускаемой абсолютной погрешности результата измерений могут быть рассчитаны по формуле:

$$\Delta \approx \pm(AB\Delta_{\text{ПИП}} + B\Delta_{\text{ИП}} + C\Delta_{\text{ВК}}) ,$$

В предположении, что погрешности ПИП, ИП и ВК независимы и обладают равномерной функцией плотности вероятности, доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности результата измерений при доверительной вероятности, равной 0,95, могут быть рассчитаны по формуле:

$$\Delta_{\text{доп}} \approx \pm 1,1 \times C \sqrt{A^2 B^2 \Delta_{\text{ПИП}}^2 + B^2 \Delta_{\text{ИП}}^2 + \Delta_{\text{ВК}}^2} .$$

Пример 6

При косвенных измерениях электрической энергии, реализуемых посредством сложного ИК (состоящего из измерительных трансформаторов напряжения и тока, счётчика электрической энергии, линии присоединения счётчика к трансформатору напряжения), расчет доверительных границ относительной погрешности измерений количества электрической энергии при доверительной вероятности, равной 0,95, выполняют по формуле (в предположении, что все составляющие погрешности имеют равномерную функцию плотности вероятности) [42]:

$$\delta_W = \pm 1,1 \times \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_\Theta^2 + \delta_\Delta^2 + \delta_{\text{co}}^2 + \sum_{i=1}^l \delta_{\text{ci}}^2} ,$$

где δ_I – пределы допускаемой токовой погрешности трансформатора тока, δ_U – пределы допускаемой погрешности напряжения трансформатора напряжения, δ_Θ – доверительные границы допускаемой погрешности трансформаторной схемы подключения счетчика (при измерениях активной или реактивной электроэнергии), δ_Δ – погрешность из-за потери напряжения в линии

соединения счетчика с трансформатором напряжения, δ_{co} – пределы допускаемой основной относительной погрешности счетчика, δ_{ci} – пределы допускаемой дополнительной погрешности счетчика от i -й влияющей величины, $\delta_{ci} = \pm \alpha_i \times (\xi_i - \xi_{i \text{норм гр}})$; l – число влияющих величин.

При этом доверительные границы допускаемой погрешности трансформаторной схемы подключения счетчика для активной и реактивной электроэнергии вычисляют по формулам соответственно:

$$\delta_{\Theta} = \pm 0,029 \times \sqrt{\Theta_I^2 + \Theta_U^2} \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi},$$

$$\delta_{\Theta} = \pm 0,029 \times \sqrt{\Theta_I^2 + \Theta_U^2} \times \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}},$$

где Θ_I и Θ_U – пределы допускаемой угловой погрешности трансформатора тока и напряжения соответственно, мин, $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Проведём расчёт доверительных границ основной относительной погрешности измерений количества активной электрической энергии (при доверительной вероятности, равной 0,95) в предположении, что ИК состоит из измерительных трансформаторов напряжения и тока (класса точности 0,5 и 0,5S соответственно) и цифрового счётчика электрической энергии (класса точности 0,5S). Также предположим, что первичный ток трансформатора тока составляет 20% от номинального значения, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$ (при емкостной нагрузке), погрешность из-за потери напряжения в линии соединения счётчика с трансформатором напряжения $\delta_{л} = 0,25\%$ [42].

При принятых предположениях доверительные границы допускаемой погрешности трансформаторной схемы подключения счетчика равны:

$$\delta_{\Theta} = \pm 0,029 \times \sqrt{45^2 + 20^2} \times \frac{\sqrt{1 - 0,8^2}}{0,8} \approx \pm 1,1\%,$$

где $\Theta_I = 45$ мин и $\Theta_U = 20$ мин – пределы допускаемой угловой погрешности трансформатора тока [45] и напряжения [46] соответственно.

После подстановки полученного значения δ_{Θ} и регламентированных в стандартах значений $\delta_I = 0,75\%$ [45], $\delta_U = 0,5\%$ [46], $\delta_{co} = 0,6\%$ [47] в формулу для доверительных границ основной относительной погрешности измерений количества активной электрической энергии получим (последнее слагаемое равно нулю, поскольку расчёт проводится для нормальных условий эксплуатации счётчика):

$$\delta_w = \pm 1,1 \times \sqrt{0,75^2 + 0,5^2 + 1,1^2 + 0,25^2 + 0,6^2 + 0^2} \approx \pm 1,7\%.$$

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Состав и характеристики ИК в полной мере определяются компонентами, его образующими, и регламентируются как в проектной и эксплуатационной документации, так и в описании типа. Регламентация должна отражать соответствие совокупности компонентов ИК и условий их эксплуатации диапазону измерений и нормируемым МХ, а, следовательно, и методам проверки соответствия МХ установленным нормам. Именно поэтому целесообразно рассмотреть требования к составу и характеристикам ИК в сопоставлении с классификационными признаками ИС и ИК, рассмотренными на рис. 2–4, 7 и 8.

3.1. Регламентация состава ИК

Требования к регламентации состава и характеристик ИК в сопоставлении с классификационными признаками ИС приведены в таблице 7.

В частности, состав ИК должен быть по-разному регламентирован для ИС-1 и ИС-2.

Так, например, для ИС-1 должны быть регламентированы компоненты ИК *каждого вида* с указанием типов СИ, его образующих. Кроме того, для ИК каждого вида должны быть регламентированы диапазон измерений и МХ, а для компонентов ИК – условия их эксплуатации. Пример регламентации состава ИК ИС-1 заимствован из описания типа ИИС GRANTEK – № 32211-07 в Государственном реестре СИ и приведён в таблице 8.

Вместе с тем, для ИС-2 должны быть регламентированы компоненты *каждого экземпляра* ИК с указанием типов СИ¹⁰, его образующих, и места их установки. Пример регламентации состава ИК ИС-2 заимствован из описания типа АИИС КУЭ ПГУ – № 36714-08 в Государственном реестре СИ и приведён в таблице 9. При этом диапазоны измерений и МХ *каждого экземпляра* ИК приведены в разделе “Основные технические характеристики” указанного описания типа.

¹⁰ В соответствии с пунктом 7.3 ГОСТ Р 8.596 [1] в составе ИК ИС-2 должны применяться измерительные и комплексные компоненты только утвержденных типов.

Однако, воспользовавшись исключением к пункту 7.3 ГОСТ Р 8.596 [1], в составе ИК ИС-2 всё же могут быть использованы компоненты неутверждённого типа. При этом МХ должны быть регламентированы для ИК в целом, и для проверки их соответствия установленным нормам должны быть регламентированы исключительно комплектные методы (для ИК в целом).

Таблица 7 – Требования к регламентации состава и характеристик ИК ИС

№	Требования к ИК / признаки классификации ИС	Классы ИС	
		ИС-1	ИС-2
1	По проектированию ИС		
1.1	Состав ИК с указанием типов СИ, его образующих, должен быть регламентирован:	для ИК каждого типа	для каждого экземпляра ИК с указанием места его установки
1.2	Условия эксплуатации компонентов должны быть регламентированы:	для ИК каждого типа или каждого компонента ИС	для каждого экземпляра ИК, группы ИК или каждого компонента ИС
1.3	Диапазон измерений, нормируемые МХ и методы проверки соответствия МХ установленным нормам должны быть регламентированы:	для ИК каждого типа	для каждого экземпляра ИК или группы ИК
2	По характеру обслуживания	Обслуживаемые	Необслуживаемые
2.1	Характеристики надёжности компонентов должны обеспечивать установленные МХ и характеристики надёжности ИС	в течение интервала между поверками	в течение срока службы ИС
2.2	Резервирование компонентов должно обеспечивать:	возможность проведения технического обслуживания и ремонта ИС	требуемые характеристики надёжности ИС
3	По распределённости на объекте	Распределённые	Локализованные
3.1	Условия эксплуатации компонентов должны быть регламентированы, подлежать контролю и обеспечению	в нескольких помещениях	в одном помещении
3.2	К связующим компонентам должны быть регламентированы требования по обеспечению защиты от несанкционированного доступа через линии связи (включая беспроводные) и переходные устройства, а также требования по обеспечению:	надёжной (в том числе беспроводной) передачи достоверной информации в условиях электромагнитных помех	надёжной передачи достоверной информации и, преимущественно, измерительных сигналов с их минимально возможными искажениями

Таблица 8 – Пример регламентации состава ИК ИС-1

№ ИК	Наименование ИК	Диапазон измерений	СИ, входящие в состав ИК	Пределы допускаемой основной погрешности компонентов ИК	Пределы допускаемой основной погрешности ИК
1	ИК температуры	(0 – 1000) °С	ТХА 9419	Класс 2	$\Delta = \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
			ИПМ 0399	$\gamma = \pm 0,5\%$	
			Модуль IC200ALG240 ПЛК	$\gamma = \pm 0,1\%$	
3	ИК объёмного расхода	(12 – 300) м³/ч	УРСВ “ВЗЛЁТ-МР”	$\delta = \pm 2\%$	$\delta = \pm 3\%$
			Модуль IC200ALG240 ПЛК	$\gamma = \pm 0,1\%$	
6	ИК объёмной доли компонентов в веществе	(0 – 2,5) %	АГ-0011	$\gamma = \pm 4\%$	$\gamma = \pm 6\%$
			Модуль IC200ALG240 ПЛК	$\gamma = \pm 0,1\%$	
12	ИК давления	ВПИ 600 кПа	Метран-100-ДИ	$\gamma = \pm 1\%$	$\gamma = \pm 2\%$
			Модуль IC200ALG240 ПЛК	$\gamma = \pm 0,1\%$	

Таблица 9 – Пример регламентации состава ИК ИС-2

№ ИК	Наименование присоединения	СИ, входящие в состав ИК	Класс точности	№ в Гос. реестре СИ	Кол-во, шт.
1	Генератор паровой турбины ГП-1	ТШЛ 20-1	0,2	21255-03	3
		ЗНОЛ.06	0,2	3344-04	3
		Альфа А1800	0,2S/0,5	31857-06	1
4	ВЛ-110 кВ “Ильинская-1”	ЕХК-СТ0	0,2S	33112-06	1
		STE3/123	0,2	33110-06	1
		Альфа А1800	0,2S/0,5	31857-06	1
22	КРУ-6 кВ С-1 яч.1	ТЛШ-10	0,2S	11077-03	3
		ЗНОЛП	0,2	23544-02	3
		Альфа А1800	0,2S/0,5	31857-06	1
Второй уровень ИК построен на базе устройства сбора и передачи данных типа RTU-325 (№ 19495-03 в Государственном реестре СИ)					

Следует отметить, что указание заводских номеров компонентов для каждого экземпляра ИК в описании типа ИС нецелесообразно, поскольку приведёт к неоправданному усложнению процедуры замены одних компонентов ИК на другие однотипные (с тем же номером в Государственном реестре СИ). Один из вариантов реализации такой процедуры предусмотрен МИ 2999 [28]. По мнению автора, достаточно указания заводских номеров компонентов ИК в эксплуатационной документации на ИС (формуляре или паспорте), в акте испытаний для целей утверждения типа и в свидетельстве о поверке.

Вместе с тем, заводские номера компонентов ИК (кроме как в перечисленных документах) должны обязательно указываться в описании типа ИС, но лишь в том случае, если МХ ИК регламентированы с использованием индивидуальных МХ, присущих конкретным экземплярам компонентов, образующих ИК, другими словами, при использовании индивидуальной градуировки таких ИК.

3.2. Регламентация характеристик ИК

В соответствии с шестью признаками классификации, рассмотренными в пункте 1.3, ИК могут быть классифицированы на $2^6=64$ класса. Разумеется, рассмотреть все классы в рамках настоящей работы не представляется возможным. Объединим классы ИК в 3 наиболее распространённые группы, отличающиеся охватом компонентов ИК при передаче размера единиц величин: с поэлементной (1 группа), “частично комплектной” (2 группа) или комплектной (3 группа) передачей размера единиц величин.

Результаты такого объединения классов ИК в сопоставлении с признаками классификации вариантов нормирования МХ ИК (рис. 7) и методов подтверждения соответствия МХ ИК установленным нормам (рис. 8) приведены в таблице 10.

Первую группу составляют классы ИК, для которых регламентированы характеристики, подтверждаемые расчётными методами на основании МХ компонентов, образующих ИК. При этом методы проверки соответствия МХ ИК установленным нормам подразделяются на (см. первый признак на рис. 8): методы контроля МХ и методы определения МХ. При использовании методов контроля МХ ИК (т.е. при поверке ИК с групповыми МХ) для расчётов должны быть использованы значения МХ компонентов, регламентированные для них в качестве норм. При использовании же методов определения действительных значений МХ ИК (т.е. при калибровке ИК с индивидуальными МХ) для расчётов должны быть использованы оценки значений МХ компонентов, полученные экспериментально для конкретных экземпляров компонентов, образующих конкретный экземпляр ИК.

Таблица 10 – Особенности метрологического обеспечения групп ИК

Рис.	Признаки классификации	Группы ИК		
		1	2	3
8	По охвату компонентов ИК при передаче размера единиц величин	Поэлементные	“Частично комплектные” (комбинированные)	Комплектные
8	По наличию эксперимента при проверке соответствия МХ ИК установленным нормам	Расчётные	Расчётно-экспериментальные	Экспериментальные
7	По регламентации нормальных условий	Без нормирования нормальных условий	С нормированием нормальных условий компонентов, поверяемых комплектно	С нормированием нормальных условий
7	По нормированию МХ компонентов ИК	С нормированием МХ компонентов ИК	С нормированием МХ ПИП	Без нормирования МХ компонентов ИК

Отличительным признаком ИК первой группы является поэлементная передача размера единиц величин компонентам ИК. Следовательно, нормирование нормальных условий эксплуатации для таких ИК не имеет смысла, поскольку проведение экспериментальных проверок, не связанных с передачей размера единиц величин (см. пункт 3.3.2), может быть выполнено в рабочих условиях эксплуатации ИК.

Отличительным признаком ИК второй группы является “частично комплектная” (комбинированная) передача размера единиц величин компонентам ИК, при которой передача размера единиц величин первичным измерительным преобразователям (ПИП) осуществляется поэлементно, а оставшейся части ИК – комплектно (см. пример 4).

Для ИК второй группы подтверждение МХ проводится также расчётными методами. Однако для расчётов используются не только регламентированные для ПИП значения МХ, но и экспериментально определённые значения МХ оставшейся (без ПИП) части ИК. Следовательно, для ИК второй группы требуется регламентация нормальных условий эксплуатации, необходимых для передачи размера единиц величин оставшейся части ИК.

И, наконец, третью группу образуют ИК, передача размера единиц величин которым осуществляется комплектно. Для реализации передачи размера единиц величин также должны быть регламентированы нормальные условия эксплуатации ИК.

Регламентация МХ ИК третьей группы должна осуществляться методами, принятыми для традиционных СИ. При этом нормирование МХ компонентов, образующих ИК, теряет смысл.

Следует также отметить, что измерительные и комплексные компоненты, образующие ИК, размер единиц величин которым передаётся комплектно (т.е. для ИК третьей и “оставшейся части” ИК второй группы), теряют функциональную самостоятельность. Следовательно, СИ, поверяемые комплектно в составе ИК, не должны подлежать поверке отдельно от ИК. С одной стороны, СИ утверждённого типа, входящие в состав ИК, применяемые в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны проходить поверку в соответствии с нормативными документами, регламентирующими их поверку. С другой стороны, такие СИ входят в состав ИК ИС и отдельно от него не применяются. Зачем такие СИ поверять 2 раза: отдельно (поэлементно) и в составе ИК (комплектно)? Это не только расточительно, но и нецелесообразно. Для разрешения подобных противоречий в нормативных документах, регламентирующих поверку ИС, должно быть прямое указание на нецелесообразность поэлементной поверки СИ (с указанием их перечня), поверяемых комплектно в составе ИК ИС [48].

Разумеется, один и тот же класс ИК может оказаться в любой из трёх групп.

Пример 7

Простой ИК, состоящий из трёх преобразователей: ПИП, ИП и ВК (см. рис. 10), может быть отнесён к любой из трёх групп:

1 группа – поэлементная передача размера единиц величин ПИП и ИП, а также проверка ВК;

2 группа – “частично комплектная” передача размера единиц величин:
– поэлементная – ПИП;

– комплектная – комплексному компоненту – ИВК, состоящему из ИП и ВК совместно с линиями связи;

3 группа – комплектная передача размера единиц величин ИК в целом.

Выше (см. пример 5) уже отмечалось, что типичным представителем такого ИК является, например, ИК давления при условии, что в качестве ПИП используется датчик давления с токовым выходным сигналом, а в качестве ИП – преобразователь тока в цифровой код. При этом в вычислительном компоненте реализуется преобразование кода тока в код давления с отображением результата измерений давления на мониторе.

Рассмотрим способы регламентации характеристик ИК давления каждой из трёх групп.

Для ИК группы 1 должны быть регламентированы:

- а) диапазон измерений ИК,
- б) параметры функции преобразования ИК,
- в) характеристики линий связи,
- г) условия эксплуатации.

На основании указанных исходных данных, характеристик погрешности, вносимой ПО (реализованным в ВК), а также характеристик, регламентированных для ПИП и ИП:

- а) диапазон измерений ПИП и ИП,
- б) характеристики функции преобразования ПИП и ИП,
- в) характеристики погрешности ПИП и ИП,
- г) характеристики чувствительности к влияющим величинам ПИП и ИП,
- д) динамические характеристики ПИП и ИП,

расчётными методами (см. пункт 2.3.2) должны быть регламентированы характеристики погрешности и динамические характеристики ИК.

Для проверки соответствия характеристик ИК группы 1 установленным нормам достаточно:

- а) рассмотреть свидетельства о поверке или отметки в эксплуатационной документации, подтверждающие пригодность ПИП и ИП к применению, оформленные на основании поэлементной поверки ПИП и ИП, проведённой в соответствии с нормативными документами, утверждёнными по результатам испытаний для целей утверждения типа ПИП и ИП,
- б) провести внешний осмотр, проверку условий эксплуатации компонентов и опробование ИК,
- в) провести идентификацию ПО (проверку версии и контрольной суммы, которые должны быть указаны в описании типа ИС, методике поверки ИС и эксплуатационной документации ИС),
- г) провести проверку защиты ПО от несанкционированного доступа.

Следовательно, для ИК первой группы понятие интервала между поверками – условное понятие, хотя и формально необходимое. ПИП и ИП должны поверяться с соблюдением межповерочного интервала, регламентированного для них при утверждении их типа. При этом межповерочные интервалы ПИП, ИП и ИС могут отличаться.

В подтверждение сказанному приведу пример широко распространенного сложного канала измерений электрической энергии и мощности АИИС КУЭ, который также может быть отнесён к ИК 1 группы. Для большинства АИИС КУЭ регламентирован четырёхлетний интервал между поверками, а для измерительных трансформаторов напряжения и тока, счётчика электрической энергии и ИВК, образующих этот сложный ИК, – от 4 до 16 лет. При этом компоненты ИК проходят поверку поэлементно с соблюдением межповерочного интервала, регламентированного для них, независимо от проведения поверки АИИС КУЭ.

Для ИК группы 2 должны быть регламентированы:

- а) диапазон измерений ИК,
- б) параметры функции преобразования ИК,
- в) условия эксплуатации.

На основании указанных исходных данных, а также характеристик, регламентированных для ПИП:

- а) диапазон измерений,
- б) характеристики функции преобразования,
- в) характеристики погрешности,
- г) характеристики чувствительности к влияющим величинам,
- д) динамические характеристики ПИП,

и характеристик ИВК, подтверждённых совместно с линиями связи экспериментально (комплектно), также расчётными методами (см. пункт 2.3.2) должны быть регламентированы характеристики погрешности и динамические характеристики ИК.

Для проверки соответствия характеристик ИК группы 2 установленным нормам необходимо:

а) рассмотреть свидетельство о поверке или отметку в эксплуатационной документации, подтверждающие пригодность ПИП к применению, оформленные на основании поэлементной поверки ПИП, проведённой в соответствии с нормативными документами, утверждёнными по результатам испытаний для целей утверждения типа ПИП,

б) провести экспериментальную проверку соответствия характеристик ИВК совместно с линиями связи нормам, установленным в описании типа ИС, методике поверки ИС и эксплуатационной документации ИС,

в) провести внешний осмотр, проверку условий эксплуатации компонентов и опробование ИК,

г) провести идентификацию ПО (проверку версии и контрольной суммы, которые должны быть указаны в описании типа ИС, методике поверки ИС и эксплуатационной документации ИС),

д) провести проверку защиты ПО от несанкционированного доступа.

Следовательно, для ИК второй группы интервал между поверками должен совпадать с межповерочным интервалом ИВК. ПИП должны поверяться с соблюдением межповерочного интервала, регламентированного для них при утверждении их типа. При этом межповерочный интервал ПИП и ИС могут отличаться.

Кроме того, несмотря на то, что характеристики погрешности, вносимой ПО (реализованным в ВК), проверяются экспериментально (комплектно), всё же необходимо также проводить и проверку идентификации ПО, чтобы убедиться в его целостности и неизменности.

Как отмечено выше, регламентация характеристик ИК группы 3 должна осуществляться методами, принятыми для традиционных СИ.

При регламентации характеристик целесообразно, чтобы в состав ИС входили ИК только одной из трёх групп, что упростило бы метрологическое обеспечение ИС, хотя, разумеется, это не всегда возможно.

3.3. Поверка ИС

Несмотря на то, что ИС обладают всеми основными признаками средств измерений (СИ) и являются их разновидностью [41], при разработке методики поверки и проведении поверки ИС приходится сталкиваться с многочисленными специфическими особенностями, свойственными именно ИС, такими как:

- представление ИС на поверку;
- регламентация нормальных условий (с учётом распределённости компонентов ИС в пространстве) и их реализация при проведении поверки ИС;
- установление минимального (но достаточного) количества операций поверки (в частности, после ремонта одного из многочисленных компонентов ИС);
- установление интервалов между поверками ИС;
- определение даты действия свидетельства о поверке.

3.3.1. Представление ИС на поверку

При представлении ИС на поверку (и в организации поверочных работ) в сравнении с традиционными СИ можно выделить следующие отличительные признаки.

Во-первых, **возможность** представления ИС на поверку – даже временные перерывы в работе ИС (или отдельных её ИК) могут оказаться недопустимы. Следовательно, одним из обязательных требований к таким ИС должно быть **наличие резервных ИК**, что позволило бы не только проводить **метрологическое обслуживание (ремонт, градуировку, поверку) без остановки ИС в целом**, но и привело бы к повышению надёжности ИС.

Во-вторых, время проведения поверки – время, затрачиваемое на поверку многоканальной ИС, многократно превышает время поверки традиционных СИ и может составлять до нескольких недель. Следовательно, на время проведения поверки статус ИС не определён, и её применение в сферах государственного регулирования обеспечения единства измерений невозможно. Целесообразно было бы предусмотреть возможность **проведения поверки одних ИК ИС при одновременном функционировании других её ИК** (т.е. при функционировании ИС в целом!). Это предполагает решение вопроса со статусом ИС – пригодности к применению одних ИК ИС при одновременном метрологическом обслуживании других её ИК.

В-третьих, возможность замены на время поверки – взамен СИ, представленного на поверку, могут быть использованы другие экземпляры СИ того же типа или аналогичные СИ; взамен же поверяемой ИС другого экземпляра ИС того же типа нет.

В-четвёртых, возможность доставки к месту поверки – большинство СИ могут быть доставлены к месту поверки, а большинство ИС – нет. Поэтому периодическая поверка ИС проводится по месту её размещения, а средства поверки (эталоны и вспомогательное оборудование) должны быть доставлены к месту размещения ИС. При этом характеристики погрешности средств поверки, применяемых в условиях поверки ИС (которые могут отличаться от нормальных условий эксплуатации средств поверки), должны удовлетворять требованиям достоверности поверки ИС.

3.3.2. Условия поверки

Для большинства ИС различные компоненты даже одного ИК могут иметь различные диапазоны нормальных значений влияющих величин. Какие же условия в этом случае должны быть приняты за нормальные для всей ИС или, быть может, для различных компонентов ИС должны быть назначены различные нормальные условия?

По-видимому, *нормальные условия* (необходимые для передачи размера единиц величин от эталонов рабочим СИ) *при поверке ИС теряют общепринятый смысл.*

Учитывая, что “результатом поверки является подтверждение пригодности СИ к применению” [15], то поверка заключается не только в передаче размера единиц величин, которая должна осуществляться в нормальных условиях для каждого компонента ИС, но и в различных проверках (внешнего вида, условий эксплуатации компонентов, работоспособности, характеристик безопасности, взаимного влияния каналов и др.), которые вполне могут быть выполнены в рабочих условиях.

Следует отметить, что передача размера единиц величин измерительному каналу ИС, развёрнутой на объекте (т.е. комплектная поверка), в большинстве случаев невозможна в связи с практической недостижимостью поддержания нормальных условий эксплуатации каждого компонента ИС. Именно поэтому передача размера единиц величин может быть выполнена не ИК ИС в целом, а лишь каждому его компоненту (т.е. поэлементная поверка).

Таким образом, при проведении поверки ИС компоненты ИК, являющиеся СИ, должны быть предварительно поверены в соответствии с требованиями нормативных документов, регламентирующих их поверку, т.е. *компоненты ИК должны быть поверены поэлементно.* Поэтому в качестве условий поверки таких ИС могут быть использованы рабочие условия эксплуатации компонентов ИС.

3.3.3. Операции поверки

Выше уже отмечалось, что продолжительность поверки многоканальной ИС значительна, а потому задача сокращения объема экспериментальных исследований при приемлемой достоверности поверки – задача первостепенной важности! Именно поэтому важно грамотно распределить операции подтверждения соответствия МХ ИК ИС установленным нормам между процедурами: испытаниями для целей утверждения типа, первичной и периодической поверками.

Для подтверждения соответствия МХ ИК ИС установленным нормам довольно часто применяются расчётные методы (см. пункт 2.3.2). При этом операции по подтверждению соответствия МХ ИК ИС установленным нормам сводятся к поэлементной поверке компонентов ИК ИС (см. пункт 2.3.2) и расчёту характеристик погрешности ИК ИС, проводимым на основе нормированных МХ компонентов и предельных значений влияющих величин рабочих условий эксплуатации компонентов ИС. В результате расчёты всегда дают одни и те же результаты. Именно поэтому повторение таких расчётов при проведении периодической поверки нецелесообразно. ***Достаточно выполнить расчёты один раз при проведении испытаний для целей утверждения типа (или первичной поверке, проводимой после замены компонентов) ИС.*** Другое дело, если расчёты основаны на использовании экспериментально установленных границ погрешности компонентов ИК ИС (которые обычно меньше нормированных пределов) и фактических значений влияющих величин (а не диапазонов их изменения), что, безусловно, позволит уменьшить границы погрешности, устанавливаемые в качестве нормы для ИК ИС.

Не менее важным является вопрос ***минимизации проверок программного обеспечения*** (ПО) на различных этапах жизненного цикла ИС. На этапе утверждения типа ИС (кроме проверок документации) и на этапе первичной поверки при вводе ИС в эксплуатацию целесообразно проводить следующие проверки, рекомендованные МИ 2891 [22]:

- а) идентификация – проверка версии ПО и контрольной суммы;
- б) опробование – проверка функционирования всех ИК и функций, реализуемых с помощью ИС;
- в) проверка погрешности вычислений (при нормировании погрешности вычислений) или погрешности сложных ИК (при нормировании погрешности ИК совместно с ПО);
- г) проверка защиты от несанкционированного доступа к хранимым результатам измерений и к настройкам ПО.

Вместе с тем на этапе первичной поверки после ремонта ИС проведение проверок по пунктам в) и г) достаточно выполнять лишь в объеме вносимых изменений, а при выполнении периодической поверки – достаточно ограничиться проведением проверок по пунктам а) и б).

Третьим источником сокращения продолжительности первичной поверки после ремонта ИС является **проведение поверки лишь в объеме вносимых изменений**. Для этого методика поверки ИС должна предусматривать различный объем операций поверки. Пример возможного разделения приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Операции поверки ИС

№	Наименование операции	Обязательность операции при поверке				
		первичной				периодической
		при вводе в эксплуатацию	после ремонта (замены) СИ, входящих в состав ИК	после ремонта (замены) связанных компонентов	после модернизации ЭВМ (перестройки ПО)	
1	Рассмотрение документации (в том числе свидетельств о поверке на компоненты)	да	да*	да*	да*	да
2	Внешний осмотр	да	нет	нет	да	да
3	Проверка характеристик безопасности	да	нет	да*	нет	да
4	Проверка условий эксплуатации компонентов	да	нет	нет	нет	да
5	Опробование	да	да*	да*	да	да
6	Идентификация ПО (проверка версии и контрольной суммы)	да	нет	нет	да	да
7	Проверка защиты от несанкционированного доступа	да	да*	да*	да	да
8	Проверка МХ (в том числе проверка взаимного влияния ИК)	да	да*	да*	да	да
* – в объеме вносимых изменений						

Так, в случае ремонта компонентов ИС (или их замены на однотипные) целесообразно проводить экспериментальные исследования лишь в объёме изменений, вносимых в ИС.

При замене же отдельных компонентов компьютера ИС (за исключением “жёсткого” диска) целесообразно ограничиться проведением операции опробования, а при замене компьютера (или его “жёсткого” диска), а также при переустановке операционной системы и/или ПО – операций опробования и проверки погрешности вычислений (либо погрешности сложных ИК).

Выполнение приведённых выше рекомендаций гипотетически может привести к тому, что периодическая поверка ИС будет заключаться лишь в проверке:

- документов, подтверждающих поэлементную поверку компонентов ИК, являющихся СИ,
- журналов регистрации условий эксплуатации компонентов ИС,
- подлинности ПО и защиты от несанкционированного доступа.

3.3.4. Установление межповерочных интервалов

Межповерочные интервалы регламентируют интервалы времени между *периодическими* поверками СИ, устанавливаются при утверждении типа СИ и должны соответствовать “нормированным показателям надежности испытываемого СИ” [20].

Очевидно, что выполнение этого требования в применении к многоканальной ИС, состоящей, например, из нескольких тысяч или десятков тысяч ИК, приведёт к необходимости ежемесячного (и даже ежедневного!) проведения ремонта (замены) хотя бы одного из компонентов ИС, вызванной его отказом. Следовательно, время наработки на отказ подобной ИС составит несколько сотен часов [49]. Учитывая, что межповерочный интервал ИС должен соответствовать нормированному показателю надежности, то, рассуждая формально, он также должен составить несколько сотен часов.

С другой стороны, как отмечалось в пункте 3.3.2, “результатом поверки является подтверждение пригодности СИ к применению” [15]. Трудно представить, чтобы передача размера единиц величин измерительным каналам такой ИС, развёрнутой на объекте, осуществлялась комплектно. Очевидно, что процедура такой поверки займёт не одну неделю. При этом по мере проверки одних ИК, начнут отказывать другие, в том числе уже проверенные. Следовательно, для подобной ИС компоненты ИК должны быть предварительно поверены поэлементно, т.е. такие ИК должны быть отнесены к ИК первой группы (см. пункт 3.2). Тогда среди операций периодической поверки ИС будут

отсутствовать экспериментальные проверки, а сама поверка не займёт много времени, т.к. среди операций поверки будут, в основном, проверка документов и идентификация ПО. По результатам выполнения этих операций вполне можно будет судить о пригодности ИС к применению.

Именно такой подход принят к назначению межповерочных интервалов АИИС КУЭ, для большинства из которых он составляет 4 года. Измерительные компоненты АИИС КУЭ (измерительные трансформаторы тока и напряжения, счётчики электрической энергии и ИВК) поверяются поэлементно в соответствии с регламентированными для них межповерочными интервалами и нормативными документами, регламентирующими их поверку. Исключение составляют лишь компоненты системы обеспечения единого времени, экспериментальная поверка которых осуществляется при проведении поверки АИИС КУЭ.

Установление межповерочных интервалов для ИС, в состав которой входят несколько десятков ИК, компоненты которых поверяются поэлементно, может осуществляться аналогично. В том же случае, если передача размера единиц величин измерительным каналам такой ИС осуществляется комплектно, целесообразно использовать методы, принятые для традиционных СИ [50, 51].

3.2.5. Оформление результатов поверки

При положительных результатах поверки ИС (первичной при вводе в эксплуатацию и периодической) должно быть оформлено свидетельство о поверке по форме приложения 1а к ПР 50.2.006 [15]. Очевидно, что состав ИК ИС разместить на бланке свидетельства о поверке невозможно. Поэтому состав ИК ИС должен быть приведён в приложении к свидетельству о поверке, каждая страница которого должна быть заверена подписью поверителя.

Процедура определения срока действия свидетельства о поверке (для указания в графе “действительно до «__» _____ 200_ г.”) должна быть регламентирована методикой поверки. Напрашиваются два варианта. В первом из них срок действия свидетельства о поверке ИС должен устанавливаться по дате ближайшего окончания пригодности к применению среди всех СИ, входящих в состав ИС, а во втором – на основании межповерочного интервала ИС.

При положительных результатах первичной поверки (после ремонта, связанного в том числе с заменой компонентов ИС на однотипные поверенные, а также после ввода новых или исключения действующих ИК), проведённой в объёме поверки ИК в части вносимых изме-

нений, в соответствии с требованиями ПР 50.2.006 [15] должно быть оформлено новое свидетельство о первичной поверке ИС.

Процедура определения срока действия такого свидетельства о поверке также должна быть регламентирована методикой поверки. Разумно было бы сохранить без изменений дату очередной поверки ИС, поскольку поверка проведена не для всех её ИК.

Ещё проще было бы узаконить процедуру внесения изменений в приложение к свидетельству о поверке, в котором, регламентирован состав ИК ИС с указанием заводских номеров компонентов ИС.

Литература

1. **ГОСТ Р 8.596-2002.** ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.
2. **МИ 2439-97.** ГСИ. Метрологические характеристики измерительных систем. Номенклатура, принципы регламентации, определения и контроля.
3. **ПР 50.2.009-94.** ГСИ. Правила по метрологии. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений.
4. **Данилов, А. А.** Классификация измерительных систем и их измерительных каналов как основа выбора способа метрологического обслуживания / А. А. Данилов // Законодательная и прикладная метрология. – 2007. – №4. – С. 74-78.
5. **МИ 1199-86.** ГСИ. Калибраторы и преобразователи измерительные цифрового кода в постоянное электрическое напряжение и ток. Методика поверки.
6. **МИ 1202-86.** ГСИ. Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока, сопротивления цифровые. Общие требования к методике поверки.
7. **Новицкий, П. В.** Оценка погрешностей результатов измерений. / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 120-122.
8. **Данилов, А.А.** Способы регламентации характеристик погрешности сложных измерительных каналов измерительных систем / А. А. Данилов. // Измерительная техника. – 2008. – № 5. – С. 58-61.
9. **Лукашов, Ю.Е.** Поговорим о поверке. / Ю. Е. Лукашов. // Главный метролог. – 2004. – №4. – С. 49-55.
10. **Боднер, В.А.** Измерительные приборы: в 2-х т. / В. А. Боднер, А. В. Алферов. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
11. **Миронюк, Н.Е.** О влиянии систематических погрешностей измерительных каналов АИИС на распределение неучтённых потерь электроэнергии между субъектами ОРЭ / Н. Е. Миронюк // Метрологическое обеспечение измерительных систем: сб. докл. III межд. науч.-техн. конф. – Пенза. – 2006. – С. 44-48.
12. **ГОСТ 34.601-90.** Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания.
13. **МИ 1314-86.** ГСИ. Порядок проведения метрологической экспертизы технических заданий на разработку средств измерений.
14. **РМГ 63-2003.** ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации.
15. **ПР 50.2.006-94.** ГСИ. Порядок проведения поверки средств измерений.
16. **ГОСТ 8.586.5-2005.** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Методика выполнения измерений.

17. Правила учёта тепловой энергии и теплоносителя. Зарегистрировано в Минюсте РФ 25 сентября 1995 г. № 954.

18. **Кудеяров, Ю.А.** Метрологическая экспертиза программного обеспечения средств измерений: учеб. пособие. / Ю. А. Кудеяров. – М.: ФГУП “ВНИИМС”, 2007. – 32 с.

19. **ГОСТ 34.603-92.** Информационная технология. Виды испытаний автоматизированных систем.

20. **МИ 2146-98.** ГСИ. Порядок разработки и требования к содержанию программ испытаний средств измерений для целей утверждения их типа.

21. **МИ 2955-2005.** ГСИ. Порядок проведения и типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений.

22. **МИ 2891-2004.** ГСИ. Общие требования к программному обеспечению средств измерений.

23. **РМГ 51-2002.** ГСИ. Документы на методики поверки средств измерений.

24. **ПР 50.2.002-94.** ГСИ. Порядок осуществления государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами и соблюдением метрологических правил и норм.

25. **МИ 2304-94.** ГСИ. Метрологический контроль и надзор, осуществляемые метрологическими службами юридических лиц.

26. **ГОСТ 8.009-84.** ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

27. **ГОСТ 26.203-81.** Комплексы измерительно-вычислительные. Признаки классификации. Общие требования.

28. **МИ 2999-2006.** ГСИ. Системы автоматизированные информационно-измерительные коммерческого учета электроэнергии. Рекомендации по составлению описания типа.

29. **МИ 2083-90.** ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

30. **ГОСТ 8.156-83.** ГСИ. Счётчики холодной воды. Методы и средства поверки.

31. **МИ 2440-97.** ГСИ. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов измерительных систем и измерительных комплексов.

32. **МИ 3000-2006.** ГСИ. Системы автоматизированные информационно-измерительные коммерческого учета электроэнергии. Типовая методика поверки.

33. **РМГ 29-99.** ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

34. **МИ 187-86.** ГСИ. Критерии достоверности и параметры методик поверки.

35. **МИ 188-86.** ГСИ. Установление значений параметров методик поверки.

36. **Вострокнутов, Н. Н.** О возможности поверки средств измерений в условиях, отличных от нормальных / Н. Н. Вострокнутов, К. В. Сапожникова, Г. Н. Солопченко, В. Б. Якомаскин // Измерительная техника. – 1992. – №10. – С. 8-10.

37. **Яковлев, Ю. Н.** Расчётные методы определения погрешностей измерительных каналов ИИС и АСУ ТП / Ю. Н. Яковлев // Главный метролог. – 2008. – №1. – С. 11-19.

38. **РМГ 62-2003.** ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации.

39. **МИ 222-80.** ГСИ. Методика расчета метрологических характеристик ИК ИИС по метрологическим характеристикам компонентов.

40. **МИ 2168-91.** ГСИ. Системы измерительные информационные. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов по метрологическим характеристикам линейных аналоговых компонентов.

41. **Кузнецов, В. П.** Состояние и задачи метрологического обеспечения измерительных систем / В. П. Кузнецов, И. М. Тронова // Измерительная техника. – 2004. – № 10. – С. 61-65.

42. **РД 153-34.0-11.209-99.** Автоматизированные системы контроля и учёта электроэнергии и мощности. Типовая методика выполнения измерений электроэнергии и мощности.

43. **Орнатский, П. П.** Теоретические основы информационно-измерительной техники. / П. П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1976. – С. 338-346.

44. **Рабинович, С.Г.** Погрешности измерений. / С. Г. Рабинович – Л.: Энергия, 1978. – С. 198-199.

45. **ГОСТ 7746-2001.** Трансформаторы тока. Общие технические условия.

46. **ГОСТ 1983-2001.** Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.

47. **ГОСТ Р 52323-05.** Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Часть 22. Статические счетчики активной энергии классов точности 0,2S и 0,5S.

48. **Данилов, А. А.** О передаче размера единиц величин и условиях поверки в применении к измерительным системам / А. А. Данилов // Измерительная техника. – 2007. – №4. – С. 63-65.

49. **Бойко, С.В.** Оценка надёжности АИИС КУЭ / С. В. Бойко, А. В. Кольхалов // Метрологическое обеспечение измерительных систем: сб. докл. IV межд. науч.-техн. конф. Пенза. – 2007. – С. 78-79.

50. **РМГ 74-2004.** ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.

51. **Данилов, А. А.** Методы установления и корректировки межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений / А. А. Данилов // Главный метролог. – 2005. – №6. – С. 29-36.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Принятые сокращения	4
1. Измерительные системы	5
1.1. Термины и определения	5
1.2. Классификация измерительных систем	8
1.3. Классификация измерительных каналов	12
2. Метрологические характеристики измерительных систем: процедуры, нормирование, методы подтверждения	16
2.1. Процедуры метрологического обеспечения на стадиях жизненного цикла ИС.....	16
2.2. Нормируемые метрологические характеристики измерительных каналов ИС	25
2.3. Методы подтверждения соответствия метрологических характеристик измерительных каналов ИС установленным нормам ..	34
<i>2.3.1. Экспериментальные методы</i>	35
<i>2.3.2. Расчётные методы</i>	40
3. Рекомендации по реализации метрологического обеспечения измерительных систем.....	45
3.1. Регламентация состава ИК.....	45
3.2. Регламентация характеристик ИК.....	48
3.3. Поверка ИС	53
<i>3.3.1. Представление ИС на поверку</i>	53
<i>3.3.2. Условия поверки</i>	54
<i>3.3.3. Операции поверки</i>	55
<i>3.3.4. Установление межповерочных интервалов</i>	57
<i>3.2.5. Оформление результатов поверки</i>	58
Литература.....	60