

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

**С. В. Ляльков, Ю. А. Гусынина**

## ***МЕТРОЛОГИЯ***

*Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения  
в качестве учебно-методического пособия для студентов  
специальности 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»*

Минск БГУИР 2013

УДК 006.91(076)  
ББК 30.10я73  
Л97

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра радиотехники №208 учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» (протокол №12/3 от 23.12.2011);

проректор по учебной работе учреждения образования «Белорусский государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством», кандидат технических наук, доцент Смирнов В. Г.

**Ляльков, С. В.**

Л97 Метрология : учеб.-метод. пособие / С. В. Ляльков, Ю. А. Гусынина. – Минск : БГУИР, 2013. – 136 с.  
ISBN 978-985-488-867-5.

Рассматриваются основополагающие вопросы метрологии: единицы физических величин, виды, принципы и методы измерений, теория шкал. Приведена классификация, основные характеристики и погрешности средств измерений электрических величин. Рассмотрены вопросы математической обработки результатов измерений, метрологическое обеспечение измерений и планирование измерительного эксперимента.

Предназначено для студентов приборостроительных специальностей.

Может быть полезно студентам других специальностей, а также аспирантам, магистрантам и специалистам инженерно-технического профиля.

**УДК 006.91(076)  
ББК 30.10я73**

**ISBN 978-985-488-867-5**

© Ляльков С. В., Гусынина Ю. А., 2013  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Основы метрологии .....	5
1.1	Метрология как наука об измерениях и ее значение в деятельности человеческого общества .....	5
1.2	Основные понятия в области метрологии .....	6
1.3	Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» .....	8
1.4	Физическая величина как объект измерения .....	9
1.4.1	Основные понятия и классификация .....	9
1.4.2	Размерность, единица и система единиц физических величин.....	11
1.5	Понятие измерения. Виды, принципы и методы измерений .....	17
1.5.1	Измерение. Виды измерений .....	17
1.5.2	Принципы и методы измерений .....	21
1.6	Основные положения теории шкал измерений .....	27
2	Средства измерений электрических величин .....	33
2.1	Общая характеристика средств измерений .....	33
2.2	Погрешности средств измерений .....	36
2.2.1	Определения и формы представления погрешностей СИ.....	36
2.2.2	Нормирование погрешностей СИ .....	38
2.2.3	Классы точности СИ .....	40
2.3	Классификация измерительных приборов .....	42
2.4	Основные характеристики измерительных приборов .....	47
2.4.1	Технические характеристики измерительных приборов.....	47
2.4.2	Метрологические характеристики измерительных приборов .....	47
2.5	Общие структурные схемы измерительных приборов .....	52
3	Погрешности измерений и математическая обработка результатов измерений .....	55
3.1	Погрешности измерений. Причины их возникновения и формы представления .....	55
3.2	Систематические погрешности измерений .....	60
3.2.1	Классификация систематических погрешностей .....	60
3.2.2	Способы обнаружения и оценки систематических погрешностей .....	61
3.2.3	Методы уменьшения систематических погрешностей ...	63
3.2.4	Суммирование неисключенных систематических погрешностей .....	67

3.3	Случайные погрешности измерений .....	68
3.3.1	Описание случайных погрешностей измерений .....	68
3.3.2	Оценка случайных погрешностей прямых измерений с многократным наблюдением .....	69
3.3.3	Оценка случайных погрешностей косвенных измерений с многократными наблюдениями .....	72
3.3.4	Обработка результатов многократных наблюдений .....	74
3.3.5	Оценка погрешностей измерений с однократными наблюдениями .....	76
3.3.6	Характеристики погрешности и формы представления результатов измерений .....	77
4	Метрологическое обеспечение .....	79
4.1	Основные положения метрологического обеспечения .....	79
4.2	Государственная система обеспечения единства измерений .....	82
4.2.1	Цели и задачи СОЕИ .....	82
4.2.2	Фундаментальные основы системы СОЕИ .....	83
4.2.3	Организационная структура СОЕИ .....	84
4.2.4	Государственная метрологическая служба .....	86
4.3	Основные виды деятельности по обеспечению единства измерений .....	89
4.3.1	Метрологическая аттестация СИ .....	89
4.3.2	Аттестация методик выполнения измерений .....	91
4.3.3	Поверка средств измерений .....	93
4.3.4	Калибровка средств измерений .....	97
4.3.5	Утверждение типа СИ .....	99
4.4	Общие сведения об эталонах и поверочных схемах .....	100
5	Планирование измерительного эксперимента .....	102
5.1	Основные понятия, термины и определения .....	102
5.2	Основные этапы измерительного эксперимента .....	106
5.3	Планирование измерительного эксперимента .....	110
6	Тенденции развития и применения измерительной техники .....	113
6.1	Основные направления развития и совершенствования измерений и средств измерений .....	113
6.2	Цифровые измерительные приборы .....	115
6.3	Автоматизация измерений .....	119
6.4	Информационно-измерительные системы .....	121
6.5	Понятие об интерфейсах .....	125
6.6	Виртуальные приборы и компьютерные измерительные системы .....	129

# 1 Основы метрологии

## 1.1 Метрология как наука об измерениях и ее значение в деятельности человеческого общества

Измерения играют важнейшую роль в жизни человека и общества в целом. В том или ином виде измерения возникли с появлением человека. Достоверно установлено, что более чем за четыре тысячелетия до новой эры в Древнем Египте и Месопотамии уже проводились различные виды измерений, в том числе и астрономические.

*Измерения* – один из важнейших путей познания природы, объединяющий теорию с практической деятельностью человека. Измерения являются основой научных знаний, служат для учета материальных ресурсов и планирования, обеспечения требуемого качества продукции, взаимозаменяемости деталей и узлов, совершенствования технологий, автоматизации производства, охраны здоровья и окружающей среды, обеспечения безопасности и для многих других отраслей человеческой деятельности. Измерения количественно характеризуют окружающий материальный мир, раскрывая действующие в природе закономерности. Недаром еще Галилео Галилей утверждал: «Надо измерять все измеримое и делать измеримым то, что не поддается измерению». Можно утверждать, что прогресс науки и техники определяется степенью совершенства измерений и средств измерений.

Измерениями занимались и существенно их развили многие ученые: Х. Гюйгенс, И. Ньютон, В. Вебер, О. В. Струве, Б. С. Якоби и другие. Основателем метрологии как науки считается К. Гаусс, который вместе с В. Вебером разработал абсолютную систему электрических и магнитных величин. Основателем отечественной метрологии считается выдающийся русский ученый Д. И. Менделеев. Он так определял роль и значение измерений: « В природе – мера и вес суть главное оружие познания. Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука немыслима без меры».

Метрология имеет большое значение для развития естественных и технических наук, так как повышение точности измерений – один из основных путей совершенствования познания природы человеком, открытий и практического применения точных знаний. Точные измерения неоднократно позволяли делать фундаментальные открытия.

Современная метрология опирается на физический эксперимент высокой точности, использует достижения физики, химии и других естественных наук, но вместе с тем устанавливает свои специфические законы и правила, которые позволяют находить количественное выражение свойств объектов материального мира.

Метрология служит научной основой измерительной техники. При этом под измерительной техникой, в широком смысле слова, понимают как все тех-

нические средства, с помощью которых выполняют измерения, так и саму методику проведения измерений.

Сегодня всестороннее развитие различных направлений деятельности человеческого общества невозможно без совершенствования метрологического обеспечения и измерительной аппаратуры, создания новых методов измерений и средств контроля.

## 1.2 Основные понятия в области метрологии

Чтобы справиться с разнообразными проблемами измерений, надо освоить ряд общих принципов их решения, нужна единая научная и законодательная база, которая обеспечила бы высокое качество измерений независимо от того, с какой целью их проводят. Такой базой является метрология.

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

Метрология включает общую теорию измерений физических величин, устанавливает и регламентирует единицы физических величин и их систем, порядок передачи размеров единиц от эталонов рабочим средствам измерений, методы и средства измерений, общие методы обработки результатов измерений и оценки их точности.

*Предмет метрологии* – измерения, их единство и точность. Метрология включает в себя методы выполнения практически всех измерительных работ на производстве, а также их теоретические и правовые основы.

Основной целью метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью.

*Средства метрологии* – совокупность средств измерений (СИ) и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

Основными задачами метрологии являются:

- обеспечение единства измерений;
- установление единиц физических величин;
- обеспечение единообразия средств измерений;
- установление национальных (государственных) эталонов и рабочих средств измерений, контроля и испытаний, а также передачи размеров единиц от эталонов рабочим средствам измерений;
- установление номенклатуры, методов нормирования, оценки и контроля показателей точности результатов измерений и метрологических характеристик средств измерений;
- разработка оптимальных принципов, приемов и способов обработки результатов измерений и методов оценки погрешностей.

К задачам метрологии относятся не только теоретические вопросы обеспечения единства измерений и достижения требуемой точности, но и установление обязательных правил, требований и организационных мероприятий, направленных на достижение этих целей. В связи с этим различают: тео-

ретическую (фундаментальную, научную); законодательную (правовую) и прикладную (практическую) метрологию.

*Теоретическая метрология* занимается разработкой и изучением фундаментальных вопросов теории измерений. Ее содержанием является разработка и совершенствование теоретических основ измерений и измерительной техники, научных основ обеспечения единства измерений в стране. В более широком смысле это: развитие общей теории измерений и теории погрешностей, в том числе создание новых методов и методик измерений и разработка способов исключения или уменьшения погрешностей; создание и совершенствование систем единиц физических величин; создание и совершенствование систем эталонов; создание и совершенствование научных основ передачи размеров единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений и так далее.

*Законодательная метрология* устанавливает обязательные технические и юридические требования по применению единиц физических величин, эталонов, видов, методов, методик и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений в интересах государства и мирового сообщества. По своей сути правовые основы метрологии обеспечивают единообразие средств измерений и единство измерений посредством установленных государством правил. Ее основная задача – это создание и совершенствование системы государственных технических нормативных правовых актов (ТНПА) по обеспечению единства и точности измерений, а также организация и функционирование соответствующей государственной службы. Исходным документом законодательной метрологии являются Законы Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» и «О техническом нормировании и стандартизации».

*Прикладная метрология* связана с изучением вопросов практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии. В ее ведении находятся все вопросы метрологического обеспечения.

*Единообразие средств измерений* – состояние средств измерений, характеризующееся тем, что они проградуированы в узаконенных единицах и их метрологические свойства соответствуют нормам.

*Единство измерений* – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Таким образом, для обеспечения единства измерений должны выполняться два основополагающих условия:

- выражение результатов измерений в узаконенных единицах;
- установление допускаемых погрешностей результатов измерений и пределов, за которые они не должны выходить при заданной вероятности.

### 1.3 Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений»

Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» определяет правовые и организационные основы обеспечения единства измерений в нашей стране и направлен на защиту прав и законных интересов граждан и государства от последствий неточных и неправильно выполненных измерений.

Закон устанавливает основные термины и определения в области метрологической деятельности, например: единство измерений, измерение, единица измерения, средство измерения, методика выполнения измерений, метрологический надзор и контроль. Все эти определения основываются на официальной терминологии Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ).

Основными принципами обеспечения единства измерений являются:

- приоритетное применение единиц измерений Международной системы единиц;
- применение национальных эталонов единиц величин;
- прослеживаемость результатов измерений до единиц измерений Международной системы единиц, воспроизводимых национальными эталонами единиц величин и (или) международными эталонами единиц величин;
- открытость и доступность информации в области обеспечения единства измерений;
- гармонизация национальных и международных требований об обеспечении единства измерений.

Государственное регулирование и управление в области обеспечения единства измерений, в соответствии с Законом, осуществляются Президентом, Советом Министров, Комитетом по стандартизации (Госстандартом) Республики Беларусь и иными государственными органами. Соответствующие статьи Закона определяют полномочия всех этих органов.

Закон определяет: организационную структуру и сферы деятельности метрологических служб всех уровней; объекты и порядок осуществления государственного метрологического надзора; структуру и порядок осуществления метрологического контроля; права и обязанности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и иных физических лиц в области системы обеспечения единства измерений (СОЕИ Республики Беларусь).

*СОЕИ* – это согласованная, официально признанная организационная и научно-техническая система, представляющая собой совокупность законов и норм, правил и положений, эталонов и СИ, органов и служб, деятельность которых направлена на достижение единства и требуемой точности измерений. Основные положения о СОЕИ, цели, задачи и функции этой системы регламентированы СТБ 8000-2000. Координацию всей деятельности по метрологии в стране осуществляет Госстандарт, в структуре которого для этого созданы Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ), территориальные



центры стандартизации и метрологии (ЦСМ), испытательные и поверочные центры и лаборатории, метрологические службы и другие органы.

## 1.4 Физическая величина как объект измерения

### 1.4.1 Основные понятия и классификация

В окружающем человека мире существует большое количество различных объектов, явлений и процессов. Для отличия одного объекта от другого или нахождения их общности используют качественную философскую категорию, называемую *свойством* объекта. Для количественного описания свойств объектов используют понятие «величина».

*Величина* – это свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно.

Величина не существует сама по себе, а только совместно с объектом, обладающим этими свойствами, выраженными данной величиной. Анализ величин позволяет делить их на идеальные и реальные.

*Идеальные величины* главным образом относятся к области математики и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий. Они вычисляются определенным способом.

*Реальные величины*, в свою очередь, делятся на физические и нефизические.

*Физические величины* свойственны материальным объектам (процессам, явлениям, материалам), изучаемым естественными и различными техническими науками.

К *нефизическим* следует отнести величины, присущие общественным (философия, социология, экономика и т. д.) наукам.

Современную метрологию интересуют физические величины.

*Физическая величина* – это свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них. Все электрические и радиотехнические величины являются характерными примерами физических величин.

Так, например, «сила тока» как физическая величина в качественном отношении является характеристикой различных электрорадиоэлектронных изделий. Вместе с тем количественное значение силы тока, протекающего по цепям каждого изделия, может быть различным.

Для установления различия в количественном содержании данного свойства в анализируемых объектах (явлениях, процессах) введено понятие *размера физической величины*.

*Размер физической величины* – это некоторое количественное содержание физической величины, которое присуще конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Истинный размер физической ве-

личины существует объективно, независимо от того, знаем мы его или нет (например, сопротивление конкретного резистора, ток в конкретной цепи и т. п.).

Однако на практике понятие «размер физической величины» для количественного оценивания содержания физической величины не используется, так как не содержит прямой количественной оценки. Для этого применяют понятие «значение физической величины».

*Значение физической величины* – это количественная оценка размера физической величины, представленная в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

*Числовое значение физической величины* – отвлеченное число, выражающее отношение значения физической величины к соответствующей единице данной физической величины (например, 8А – значение силы тока, при этом число 8 и есть числовое значение). Именно термин «значение» следует применять для выражения количественной стороны рассматриваемого свойства. Неправильно говорить и писать «величина тока», «величина напряжения» и так далее, поскольку ток и напряжение сами являются величинами. Правильно будет говорить и писать «значение силы тока», «значение напряжения» и т. д.

Для обозначения частных особенностей физических величин применяют термин «параметр». Например, конденсатор характеризуют таким параметром, как емкость, резистор – сопротивлением и т. д. Иногда параметром называют саму измеряемую величину – индуктивность, емкость, частоту, фазу, напряжение и другие.

*Физический параметр* – физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины.

Физические величины делят на измеряемые и оцениваемые.

*Изменяемые физические величины* можно выразить количественно определенным числом установленных единиц измерения.

Для *оцениваемых физических величин* по каким-либо причинам нельзя ввести единицу измерения и их можно только оценить. Таким образом *оценивание* – приписывание данной физической величине определенного числа принятых для нее единиц, проведенное по установленным правилам.

Физические величины в зависимости от множества размеров, которые они могут иметь при изменении в ограниченном диапазоне, подразделяются на *непрерывные (аналоговые)* и *квантованные (дискретные)*. Аналоговая величина может иметь в заданном диапазоне бесконечное множество размеров. Квантованная величина имеет в заданном диапазоне только счетное множество размеров.

Физические величины могут быть *постоянными* или *переменными* во времени. При измерении постоянной во времени величины достаточно определить одно ее мгновенное значение. Переменные во времени величины могут иметь квазидетерминированный, или случайный характер.

*Квазидетерминированная* физическая величина – это величина, для которой известен вид зависимости от времени, но не известен измеряемый параметр этой зависимости.

*Случайная* физическая величина – величина, размер которой изменяется во времени случайным образом.

По видам явлений физические величины делят на следующие группы:

– *энергетические (активные)* – физические величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. К ним относятся ток, напряжение, мощность, энергия, заряд. Их можно преобразовать в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;

– *вещественные (пассивные)* – физические величины, описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них. Из радиотехнических величин – это электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др. Для их измерения необходим вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации. При этом пассивные физические величины преобразуются в активные, которые и измеряются;

– *характеризующие временные процессы*. К этой группе относятся спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

По принадлежности к различным группам физических процессов практически все указанные физические величины принято делить на пространственно-временные, механические, тепловые, электрические, магнитные, акустические, физико-химические, световые, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

#### 1.4.2 Размерность, единица и система единиц физических величин

Совокупность величин, связанных между собой зависимостями, образуют систему физических величин, в которой имеются основные и производные величины.

*Основная физическая величина* – это величина, входящая в систему и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы.

*Производная физическая величина* – это величина, входящая в систему и определяемая через основные величины этой системы.

Важной характеристикой физической величины является ее размерность. Размерность обозначается символом  $\dim$ , происходящим от слова *dimension*, которое в зависимости от контекста может переводиться и как размер, или размерность.

*Размерность* – это выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным единице.

Размерность основной величины относительно самой себя равна единице, т. е. формула размерности основной величины совпадает с ее символом.

Например: размерность длины  $\dim l = L$ ; размерность массы  $\dim m = M$ ; размерность времени  $\dim t = T$ .

Размерность производных физических величин можно выразить через размерность основных физических величин с помощью степенного одночлена:

$$\dim Z = L^\alpha \cdot M^\beta \cdot T^\gamma \dots, \quad (1.1)$$

где  $\dim Z$  – размерность производной физической величины  $Z$ ;  $L, M, T, \dots$  – размерности соответствующих основных физических величин;  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  – показатели размерности.

*Показатель размерности физической величины* – это показатель степени, в которую возведена размерность основной физической величины, входящая в размерность производной физической величины.

Каждый из показателей размерности может быть положительным или отрицательным, целым или дробным числом, нулем.

Конкретная размерность производных величин определяется на основе соответствующих уравнений физики. Например, мощность – это физическая величина ( $P$ ), характеризующая скорость совершения работы  $A$  за интервал времени  $t$ :  $P = A/t$ . Учитывая, что работа  $A$  равна произведению силы  $F$  на элементарное перемещение  $l$  ( $A = F \cdot l$ ), а сила  $F = m \cdot a$ , где  $m$  – масса,  $a$  – ускорение ( $\dim a = l/t^2$ ), получим

$$P = \frac{m \cdot l^2}{t^3} \quad \text{и} \quad \dim P = L^2 \cdot M \cdot T^{-3}. \quad (1.2)$$

Большинство физических величин являются *размерными*, т. е. такими, в размерностях которых хотя бы одна из основных величин возведена в степень с показателем, не равным нулю.

Величина называется *безразмерной*, если в ее размерность входят основные величины в степени с показателем, равным нулю. Она может быть относительной, если определяется как отношение одноименных величин, т. е. представляет собой отношение данной физической величины к одноименной, применяемой в качестве исходной (например коэффициенты трансформации), и логарифмической, если определяется как логарифм относительной величины (например логарифм отношения напряжений).

Таким образом, *размерность* является качественной характеристикой физической величины.

Теория размерностей повсеместно применяется для оперативной проверки правильности сложных формул. Если размерности левой и правой частей уравнения не совпадают, то в выводе формулы, к какой бы области знаний она ни относилась, следует искать ошибку.

Числовые значения измеряемых физических величин зависят от используемых единиц измерений этих величин.

*Единица физической величины* – это конкретная физическая величина, определенная и принятая по соглашению, с которой сравниваются другие величины того же рода и которой условно присвоено стандартное числовое значение, равное единице.

*Шкалой величины* называют принятую по соглашению последовательность значений одноименных величин различного размера.

Чтобы избежать произвола в результатах измерений, т. е. обеспечить единство измерений, единицы физических величин устанавливают по определенным правилам и закрепляют законодательным путем. Исторически сложилось так, что единицы физических величин объединяются в системы.

Система единиц физических величин – это совокупность основных и производных единиц, образованная в соответствии с принятыми принципами.

В названии системы физических величин применяются символы величин, принятых за основные. Например, международная система СИ обозначается символами *LMTQNJ*, которые соответствуют символам величин: длине (*L*), массе (*M*), времени (*T*), силе электрического тока (*I*), температуре (*Q*), количеству вещества (*N*) и силе света (*J*).

В Республике Беларусь в установленном порядке допускаются к применению единицы величин Международной системы единиц СИ (*SI – System International*), которая была принята XI Генеральной конференцией мер и весов в 1960 г. и рекомендована к применению Международной организацией законодательной метрологии.

К основным характеристикам системы СИ относятся:

- универсальность, т. е. охват всех областей науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью в соответствии с их определением с наименьшей погрешностью;
- упрощение записи аналитических и расчетных формул и уменьшение числа допускаемых единиц;
- единая система образования кратных и дольных единиц.

Различают основные, производные, кратные, дольные, когерентные, системные и внесистемные единицы.

Основная единица системы единиц – единица основной физической величины, выбранная при построении системы единиц.

В системе СИ есть семь основных физических единиц: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, и кандела. Они имеют следующие определения.

*Единица длины* – метр (м) – длина пути, проходимого светом в вакууме за  $1/299792458$  долю секунды.

*Единица массы* – килограмм (кг) – масса, равная массе международного прототипа килограмма.

*Единица времени* – секунда (с) – время, равное  $9192631770$  периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

*Единица силы электрического тока* – ампер (А) – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 метр один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н (Ньютон) на каждый метр длины.

*Единица термодинамической температуры* – кельвин (К) –  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды (температуры, при которой три фазы воды – парообразная, жидкая и твердая – находятся в динамическом равновесии). Международным комитетом мер и весов допущено выражение термодинамической температуры и в градусах Цельсия:  $t = T - 273,15$  К, где  $t$  – температура по Цельсию;  $T$  – температура по Кельвину.

*Единица силы света* – кандела (кд) – равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср (ср –стерадиан).

*Единица количества вещества* – моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 (С-12) массой 0,012 кг.

Основные единицы СИ обеспечивают универсальность этой системы, так как являются единицами физических величин, отражающих основные свойства материального мира, и дают возможность образовывать производные единицы для любых физических величин во всех отраслях науки и техники.

Основные единицы СИ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Единицы Международной системы СИ

<b>Единицы</b>				
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
<b>Основные</b>				
Длина	$L$	метр	$m$	м
Масса	$M$	килограмм	$kg$	кг
Время	$T$	секунда	$s$	с
Сила электрического тока	$I$	ампер	$A$	А
Температура	$\theta$	кельвин	$K$	К
Количество вещества	$N$	моль	$mol$	моль
Сила света	$J$	кандела	$cd$	кд

*Производная единица системы единиц* – единица производной физической величины, образованная в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными единицами системы единиц или же с основными и уже определенными производными.

Производные единицы СИ образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или на основании определенных физических величин. Производные единицы СИ выводятся из уравнений связи между величинами (определяющих уравнений), если все другие величины выражены в единицах СИ. Например, единица мощности, выраженная через основные единицы СИ,  $1 \text{ Вт} = \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$ .

В области измерений электрических и магнитных величин имеется одна основная единица – ампер (А). Через ампер и единицу мощности ватт (Вт), единую для электрических, магнитных, механических и тепловых величин, можно определить все остальные электрические и магнитные единицы.

Однако на сегодняшний день нет достаточно точных средств воспроизведения ватта абсолютными методами. Поэтому электрические и магнитные единицы основываются на единицах силы тока и производной от ампера единицы емкости, которая называется фарад (иногда используют не регламентированный термин – фарада).

В таблице 1.2 приведены производные единицы, наиболее используемые в электрорадиотехнике при измерениях.

Таблица 1.2 – Производные единицы СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Плоский угол	$MM^{-1}$	радиан	<i>rad</i>	рад
Телесный угол	$M^2M^{-2}$	стерадиан	<i>sr</i>	ср
Частота	$T^{-1}$	герц	<i>Hz</i>	Гц
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2MT^{-2}$	джоуль	<i>J</i>	Дж
Сила, вес	$LMT^{-2}$	ньютон	<i>N</i>	Н
Мощность, поток энергии	$L^2MT^{-3}$	ватт	<i>W</i>	Вт
Электрический заряд, количество электричества	$TI$	кулон	<i>C</i>	Кл
Электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила (ЭДС), напряжение	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	<i>V</i>	В
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	<i>F</i>	Ф
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	$\Omega$	Ом
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	<i>S</i>	См
Плотность магнитного потока	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	<i>T</i>	Тл
Магнитный поток	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	<i>Wb</i>	Вб
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	<i>H</i>	Гн
Плотность электрического тока	$L^{-2}I$	ампер, деленный на квадратный метр	$A/m^2$	А/м <sup>2</sup>

Продолжение таблицы 1.2

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Напряженность электрического поля	$LM T^{-3} I^{-1}$	вольт, деленный на метр	$V/m$	В/м
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$L^3 M^{-1} T^4 I^2$	фарад, деленный на метр	$F/m$	Ф/м
Удельное электрическое сопротивление	$L^3 M T^{-3} I^{-2}$	ом, умноженный на метр	$\Omega \cdot m$	Ом·м
Полная мощность электрической цепи	$L^2 M T^{-2}$	вольт-ампер	$V \cdot A$	В·А
Реактивная мощность электрической цепи	$L^2 M T^{-3}$	вар	$var$	вар
Напряженность магнитного поля	$L^{-1} I$	ампер, деленный на метр	$A/m$	А/м

Производные единицы бывают когерентными и некогерентными.

*Когерентной* называют производную единицу физической величины, связанную с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель равен единице (например, скорость  $v$  равномерного прямолинейного движения связана с длиной пути  $l$  и временем  $t$  соотношением  $v = l/t$ ). Остальные производные единицы относятся к *некогерентным*.

Единицы физических величин делят на системные и внесистемные.

*Системная единица* – единица физической величины, входящая в принятую систему единиц. Все основные, дополнительные и производные, а также кратные и дольные единицы являются системными.

*Внесистемная единица* – единица физической величины, не входящая в принятые системы единиц. Принято выделять несколько видов внесистемных единиц:

- единицы, допускаемые наравне с единицами СИ (минута, час, сутки, литр и др.);
- единицы, применяемые в специальных областях науки и техники (световой год, парсек, диоптрия, электрон-вольт и др.);
- единицы, изъятые из употребления (миллиметр ртутного столба, лошадиная сила и др.).

К числу внесистемных относят также кратные и дольные единицы измерений, имеющие иногда собственные наименования, например единицы массы – тонна (т).

Сокращенные обозначения единиц, названных в честь великих ученых, пишутся с заглавных букв, например ампер – А; ом – Ом; вольт – В; фарад – Ф. Для сравнения: метр – м, секунд – с, килограмм – кг.



На практике применение целых единиц не всегда удобно, так как в результате измерений получают очень большие или очень малые их значения. Поэтому в системе СИ установлены десятичные кратные и дольные единицы, образуемые с помощью множителей и приставок, которые пишутся слитно с наименованием основной и производной единицы: километр (км), милливольт (мВ); мегаом (МОм).

*Кратная единица физической величины* – единица, в целое число раз большая системной, например килogerц ( $10^3$  Гц).

*Дольная единица физической величины* – единица, в целое число раз меньшая системной, например микрогенри ( $10^{-6}$  Гн).

Наименования и обозначения множителей и приставок приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц СИ

Множитель	Приставка	Обозначение множителей и приставок	
		международное	русское
$10^{18}$	экса	<i>E</i>	э
$10^{15}$	пета	<i>P</i>	п
$10^{12}$	тера	<i>T</i>	т
$10^9$	гига	<i>G</i>	Г
$10^6$	мега	<i>M</i>	М
$10^3$	кило	<i>k</i>	к
$10^2$	гекто	<i>h</i>	г
$10^1$	дека	<i>da</i>	да
$10^{-1}$	деци	<i>d</i>	д
$10^{-2}$	санти	<i>c</i>	с
$10^{-3}$	мили	<i>m</i>	м
$10^{-6}$	микро	$\mu$	мк
$10^{-9}$	нано	<i>n</i>	н
$10^{-12}$	пико	<i>p</i>	п
$10^{-15}$	фемто	<i>f</i>	ф
$10^{-18}$	атто	<i>a</i>	а

## 1.5 Понятие измерения. Виды, принципы и методы измерений

### 1.5.1 Измерение. Виды измерений

*Измерение* – это нахождение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений (СИ). Суть измерения описывают основным уравнением метрологии, которое связывает значение измеряемой величины  $A$  со значением этой величины, принятым за единицу измерения  $[A]$ :

$$A = n \cdot [A], \quad (1.3)$$

где  $n$  – числовое значение физической величины.

Например, за единицу измерения напряжения  $U$  электрического тока принят один вольт [1 В]. Тогда значение напряжения бытовой электрической сети  $U = n \cdot U_0 = 220 [1 \text{ В}] = 220 \text{ В}$ , т. е. числовое значение напряжения равно 220. Если за единицу напряжения  $U$  принят один киловольт [1 кВ], и поскольку  $1 \text{ В} = 10^{-3} \text{ кВ}$ , то напряжение  $U = n \cdot U_0 = 220 [10^{-3} \text{ кВ}] = 0,22 \text{ кВ}$ . Числовое значение напряжения будет 0,22.

Найденное в результате измерения значение физической величины называется *результатом измерения*. В технической литературе и нормативной документации часто встречается термин *алгоритм измерения*, под которым следует понимать точное предписание о порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение искомого значения величины.

Получаемую при измерениях информацию называют *измерительной*. Часто информация об объекте измерения известна до проведения измерений, что является важным фактором, обуславливающим их эффективность. Такую информацию называют *априорной* (полученной до проведения измерения). При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а следовательно, нельзя выбрать нужные средства измерения.

При наличии априорной информации об объекте в полном объеме, т. е. при известном значении измеряемой величины, измерения попросту не нужны. Априорная информация определяет достижимую точность измерений, их качество и эффективность.

Информация, получаемая в результате измерения, может содержаться в объекте измерения в двух формах: пассивной и активной. *Пассивная информация* – это совокупность сведений, заключенных в том, как устроен объект; такой информацией является, например, информация о величине напряжения источника питания. С другой стороны, информация является *активной*, если она имеет форму энергетической характеристики какого-либо явления. Подобные энергетические явления называются сигналами. Их примерами являются электрические, оптические, акустические сигналы, используемые для передачи информации.

Совокупность измерений физических величин, свойственных какой-либо области науки или техники и имеющие свою специфику, называют *областью измерений*.

Принято различать следующие основные области измерений: измерения геометрических величин; измерения механических величин; измерения параметров потока, расхода, уровня, объема веществ; физико-химические измерения; измерения времени и частоты; измерения электрических и магнитных величин на постоянном и переменном токе; измерения акустических величин; радиоэлектронных измерений и др.

Наиболее близкими к области информатики и радиоэлектроники являются следующие виды измерений: энергетических и силовых величин сигналами.

лов; параметров элементов радиотехнических устройств, параметров электромагнитных полей, параметров модулированных сигналов, параметров цепей и др.

Измерения классифицируются: по виду измеряемой величины, по способу нахождения числового значения измеряемой величины, по способу выражения результатов измерений, по характеру зависимости измеряемой величины от времени и условий, определяющих точность измерений.

По виду измеряемой величины измерения подразделяются на следующие: измерения электрических величин, электрического сопротивления, мощности электрического сигнала, частоты и времени, фазы, напряженности электромагнитного поля и др.

По способу получения числового значения измеряемой величины все измерения делят на четыре основных вида: прямые, косвенные, совокупные и совместные.

*Прямым* называют измерение, при котором искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных. Например, измерение тока амперметром, напряжения вольтметром и т. п. Математически прямые измерения можно охарактеризовать формулой

$$Q = X, \quad (1.4)$$

где  $Q$  – искомое (называется также истинным) значение измеряемой величины;  $X$  – результат измерения.

*Косвенным* называют измерение, при котором искомое значение величины вычисляют на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, получаемыми из прямых измерений. Примерами косвенных измерений можно назвать измерение мощности постоянного тока при помощи амперметра и вольтметра, определение резонансной частоты колебательного контура по результатам прямых измерений емкости и индуктивности и т. п.

Математически косвенные измерения можно характеризовать формулой

$$Q = F(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (1.5)$$

где  $X_1, X_2, \dots, X_m$  – результаты прямых измерений величин, связанных известной функциональной зависимостью  $F$  с искомым значением измеряемой величины  $Q$ .

*Совокупные и совместные* измерения характеризуются тем, что в первом случае одновременно производятся измерения нескольких одноименных, а во втором – разноименных величин и путем решения системы уравнений, связывающей их, определяется искомое значение.

Примером совокупных измерений может служить нахождение сопротивлений двух резисторов по результатам измерений сопротивлений последовательного и параллельного соединений. Искомое значение сопротивлений находят из системы двух уравнений.

Примером совместных измерений является определение коэффициентов в формуле, связывающей сопротивление резистора и температуру:

$$R_t = R_{20} \cdot [1 + \alpha(t - 20) + \beta \cdot (t - 20)^2], \quad (1.6)$$

где  $R_{20}$  – сопротивление терморезистора при  $t = 20$  °С;  $\alpha$  и  $\beta$  – температурные коэффициенты. Для определения  $R_{20}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  производят измерения  $R_{t_1}$ ,  $R_{t_2}$ ,  $R_{t_3}$  при трех различных значениях температуры ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ), а затем решают систему из трех уравнений.

Совместные и совокупные измерения по способам нахождения искомым значений измеряемых величин близки между собой. Действительно, и в одном, и в другом случае искомые значения находят путем решения систем уравнений. Отличие состоит в том, что при совокупных измерениях одновременно измеряют несколько одноименных величин, а при совместных – разноименных.

По способу выражения результатов измерения подразделяются на абсолютные и относительные.

*Абсолютные измерения* – это измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких величин и использование значений физических констант. Результат измерения непосредственно выражается в единицах измеряемой величины. Например, измерение сопротивления в омах, силы тока в амперах, емкости в фарадах, длины в метрах и т. д.

*Относительные измерения* – это измерения отношения значения физической величины к одноименной величине или изменения значения величины по отношению к одноименной величине, принятой за исходную. Характерными примерами таких измерений являются измерения коэффициентов усиления или ослабления, отношения напряжений и мощностей и т. д. Величина, полученная в результате относительных измерений, бывает безразмерной. Для таких величин допускается применение относительных логарифмических единиц (бел, октава, декада) и других относительных единиц (процент и т. д.).

Если измеряемая величина остается в процессе измерения постоянной, такие измерения называют *статическими*. Если же она изменяется, измерения будут *динамическими*. Динамические измерения, в свою очередь, могут быть непрерывными (применяемые СИ позволяют непрерывно следить за значениями измеряемой величины) и дискретными (значения измеряемой величины фиксируются только в отдельные моменты времени).

По условиям, определяющим точность результата, измерения подразделяются на три класса.

1. *Измерения максимально возможной точности*, достижимой при существующем уровне развития науки и техники. Такие измерения проводят при создании эталонов, измерениях универсальных физических констант (заряда, массы электрона; скорости света и др.), астрономических измерениях. Характерными для таких измерений являются оценка погрешностей и анализ источников их возникновения, проводимых по специальным методикам.

2. *Контрольно-поверочные измерения* – измерения, выполняемые службами метрологического надзора с целью определения метрологических характеристик СИ в специальных лабораториях (центрах). К таким измерениям относятся измерения при метрологической аттестации СИ, при поверке и калибровке СИ, электронные измерения и др. Заданная точность обеспечивается применением специальных СИ и специальных методик измерений.

3. *Технические измерения* – измерения, проводимые в заданных условиях по определенной методике, разработанной и исследованной заранее. К ним относятся все массовые измерения, проводимые во всех отраслях при производстве и эксплуатации различных объектов. При технических измерениях погрешность оценивают, как правило, по метрологическим характеристикам СИ с учетом применяемого метода измерений и условий их применения.

Важную роль в процессе измерения играют *условия измерения* – совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и средства измерения.

*Влияющая физическая величина* – физическая величина, непосредственно не измеряемая СИ, но при измерениях оказывающая влияние на результат измерения.

Различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений. При *нормальных условиях измерений* влияющие величины имеют нормальные или находящиеся в пределах нормальной области значения. *Нормальная область значений влияющей величины* – область, значений, в которой изменением результата измерений под воздействием влияющей величины можно пренебречь. *Рабочими* называются условия измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах своих рабочих областей. *Предельные условия измерений* характеризуются экстремальными значениями измеряемой и влияющей величин, которые СИ может выдержать без разрушений или ухудшения своих характеристик.

### 1.5.2 Принципы и методы измерений

Для измерений физических величин в метрологии разработаны приемы использования принципов и СИ, применение которых позволяет исключить из результатов измерения ряд систематических погрешностей и тем самым освобождает экспериментатора от необходимости определять многочисленные поправки для их компенсации, а в некоторых случаях вообще являются предпосылкой получения сколько-нибудь достоверных результатов.

*Принцип измерения* – это совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, измерение температуры с использованием термоэлектрического эффекта; измерение расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве.

Наличие в электроизмерительных приборах преобразователей измеряемых величин (в частности неэлектрических) в электрические позволяет повысить точность СИ и расширить их возможности.

Рассмотрим некоторые типичные принципы и отдельные физические явления, позволяющие преобразовать измеряемые неэлектрические величины в электрические:

– нагревание места спая двух электродов из разнородных материалов (спая термопары) вызывает появление ЭДС, что позволяет измерять температуру;

– нагревание электрических проводников и полупроводников вызывает изменение их сопротивления (термопары сопротивления, терморезисторы). Одни материалы (например, платина) позволяют получить высокую точность измерения температуры, другие материалы (особенно полупроводники) дают возможность измерять очень малые интервалы температур и температуру тел очень малого объема;

– растяжение или сжатие некоторых металлов в пределах их упругости вызывает изменение их электрического сопротивления. Это явление дает возможность изготавливать электротензометры и измерять малые деформации тел и усилия в условиях, при которых измерение другими методами невозможно, например, измерение деформации различных частей машин во время их работы. Это явление позволяет также измерять высокие и сверхвысокие давления (манганиновый манометр);

– при освещении в граничном слое между некоторыми полупроводниками и металлами возникает ЭДС. Это явление называют фотоэлектрическим эффектом. На использовании его основаны фотоэлементы, дающие возможность измерять световые величины методом непосредственной оценки, а также в ряде случаев исключать необходимость визуального наблюдения;

– электрическое сопротивление некоторых полупроводников под действием света весьма заметно изменяется. Это явление используется для изготовления фотосопротивлений. Применение фотосопротивлений требует постороннего источника тока, однако фотосопротивления обладают значительно более высокой чувствительностью, чем фотоэлементы;

– зависимость яркости свечения тела от температуры, которая в свою очередь зависит от силы тока, накаливающего нити, позволяет измерять температуру бесконтактным методом, например, при помощи оптического пирометра;

– на гранях некоторых кристаллов, когда к двум граням приложена сила, сдавливающая или растягивающая их, возникает ЭДС. Это явление, называемое пьезоэлектрическим эффектом, обратимо, т. е., когда к двум граням приложено напряжение, кристалл деформируется. Пьезоэлектрический эффект, практически безынерционный, получил широкое и разнообразное применение. Он используется для измерения давления, вибрации, частоты электрических колебаний. Особое значение этот эффект имеет для стабилизации частоты высокочастотных генераторов. Для этой цели применяются, как правило, кристаллы кварца;

– магнитная проницаемость тел из ферромагнитных материалов изменяется в зависимости от приложенных к ним механических сил (растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих). Наблюдается и обратное явление: в ферромагнитном теле при внесении его в магнитное поле возникают механические деформации. Эти явления получили название магнитострикции. Магнитное поле, изменяющееся при механическом воздействии, измеряется при помощи катушки, обмотка которой помещается на ферромагнитном сердечнике. Магнитострикционные преобразователи применяются главным образом в технике измерения звуковых и ультразвуковых колебаний;

– электрическая емкость плоского конденсатора выражается формулой  $C = \varepsilon \cdot S/d$ , где  $C$  – емкость конденсатора;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, находящегося между обкладками;  $S$  – площадь его обкладок;  $d$  – расстояние между обкладками. Изменение электрической емкости используют для измерения малых размеров и малых перемещений;

– перемещение измеряют также по изменению индуктивности катушки с сердечником из магнитомягкого материала. Изменение воздушного зазора в сердечнике вызывает изменение индуктивного сопротивления катушки, которое определяют тем или иным электрическим методом.

Совокупность приемов использования принципов и средств измерений называется *методом измерения*. Метод измерения является основной характеристикой конкретных измерений.

Все без исключения методы измерений основаны на сравнении измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой (однозначной или многозначной). При этом в зависимости от способа применения меры известной величины выделяют два основных метода измерений: метод непосредственной оценки и метод сравнения.

*Метод непосредственной оценки* – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству средства измерений. Иногда метод непосредственной оценки еще называют *методом прямого преобразования*, так как он основан на известной функциональной зависимости между показанием средства измерений и входным сигналом. Шкала прибора заранее градуируется с помощью многозначной меры в единицах измеряемой величины. Измерения с помощью этого метода проводятся очень быстро и просто и не требуют высокой квалификации оператора. Однако точность его невысока из-за погрешностей, связанных с необходимостью градуировки шкал приборов и воздействием влияющих величин (непостоянство температуры, влажности, нестабильность источников питания и т. д.). Пример: измерение тока амперметром.

Наиболее многочисленными средствами измерений, служащими для измерения методом непосредственной оценки, являются аналоговые измерительные приборы, в частности стрелочные показывающие приборы. К стрелочным показывающим приборам можно отнести манометры, динамометры, барометры, амперметры, вольтметры, фазометры, ваттметры и многие другие, которые широко используются в метрологической практике. Это объясняется тем, что данные приборы проще по конструкции, дешевле да и пока надежнее, чем цифровые. Одна из причин принципиального характера кроется в том, что на практике не так уж редки ситуации, когда стрелочная форма индикации предпочтительнее цифровой. Сюда можно отнести режимы слежения за поведением измеряемой величины, например, контроль постоянства уровня величины.

*Метод сравнения* – метод измерения, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Сравнение может быть непосредственным или опосредствованным через другие величины, однозначно связанные с первыми. Этот метод более точен, но несколько сложнее. Его от-

личительной чертой является непосредственное участие в процессе измерения меры известной величины, однородной с измеряемой.

Метод сравнения на практике реализуется в виде следующих основных модификаций: дифференциальный, нулевой, замещения, совпадения, противопоставления.

*Дифференциальный метод* – метод сравнения с мерой, при котором на измерительный прибор (не обязательно прибор сравнения) воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Неизвестную величину определяют по известной величине и измеренной разности. Этот метод на практике может быть использован только в тех случаях, когда просто и точно реализуется операция вычитания величин. Его применяют при измерении параметров цепей (сопротивления, индуктивности, взаимной индуктивности, емкости), напряжения и др. Точность метода возрастает с уменьшением разности между значениями сравниваемых величин.

Дифференциальный метод, например, используется при поверке измерительных трансформаторов тока. Принципиальная электрическая схема поверки показана на рисунке 1.1. Для определения погрешности коэффициентов трансформации проверяемый трансформатор тока  $T_X$  сравнивают с образцовым  $T_0$ . Первичные обмотки обоих трансформаторов включены в цепь одного и того же тока  $I_1$ . Вторичные обмотки включены таким образом, что их токи  $I_X$  и  $I_0$  направлены навстречу друг другу. Разность между этими токами, измеряемая при помощи измерительного прибора ИП, пропорциональна разности коэффициентов трансформации, т. е. погрешности коэффициента трансформации проверяемого трансформатора  $T_X$ .

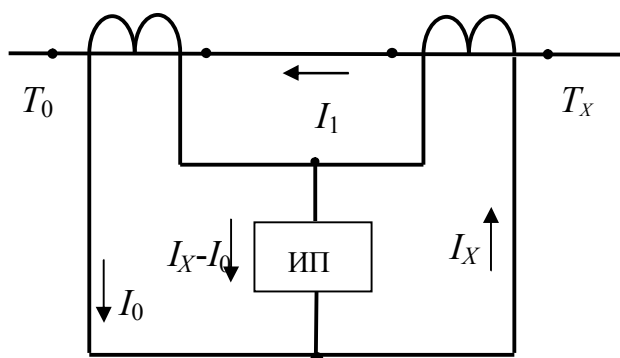


Рисунок 1.1 – Принципиальная электрическая схема поверки измерительных трансформаторов

Приведенная на рисунке 1.1 схема является упрощенной. В конструкцию установок для проверки измерительных трансформаторов дифференциальным методом введен ряд дополнений, которые позволяют определить не только погрешность коэффициента трансформации, но и погрешности угла сдвига фаз между токами в первичной и вторичной цепях. Аналогичная схема применяется и для поверки измерительных трансформаторов напряжения.

*Нулевой метод* – метод сравнения с мерой, при котором результирующий эффект воздействия измеряемой и известной величин на прибор сравнения (нуль-индикатор) доводят до нуля. В этом случае компенсация воздействия влияющих величин оказывается наиболее полной. Значение измеряемой величины принимается равным значению меры. При высокой точности мер, воспроизводящих известную величину, и вы-



сокой чувствительности нуль-индикатора может быть достигнута высокая точность измерения.

Примером средств измерений, в которых используется нулевой метод, являются мосты для измерения сопротивления, емкости и индуктивности. На рисунке 1.2 показана схема моста для измерения сопротивления  $R_x$ . Схема состоит из трех сопротивлений с известными значениями ( $R_2$ ,  $R_3$ , и  $R_4$ ), измеряемого сопротивления  $R_x$ , нуль-индикатора НИ и источника постоянного тока ИПТ.

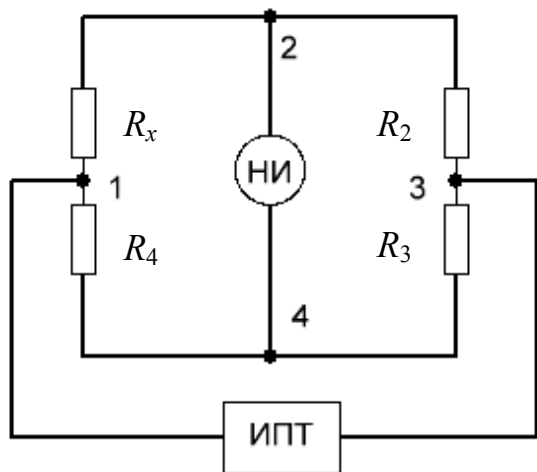


Рисунок 1.2 – Схема моста постоянного тока

*Метод замещения* – метод сравнения с мерой, при котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Замещение может быть полным или неполным, в зависимости от чего говорят о методе полного и неполного замещения. При полном замещении показания не изменяются и результат измерения принимается равным значению меры. При неполном замещении для получения значения измеряемой величины к значению меры необходимо прибавить величину, на которую изменилось показание прибора. Преимущество метода замещения заключается в последовательном сравнении во времени измеряемой величины и величины, воспроизводимой меры. Благодаря тому, что обе эти величины включаются одна за другой в одну и ту же часть измерительной цепи прибора, точностные возможности измерений этим методом значительно повышаются по сравнению с измерениями, проводящимися другими разновидностями метода сравнения, где несимметрия цепей, в которые включаются сравниваемые величины, приводит к возникновению систематических погрешностей. Метод замещения часто применяют при измерении параметров цепей, например, рабочего затухания с использованием образцового магазина затуханий, емкости, индуктивности и т. д.

Применение метода замещения позволяет исключить ряд систематических погрешностей, возникающих в процессе измерения в некоторых средствах

нет разности потенциалов, или, другими словами, падение напряжения между точками 1–2 равно падению напряжения между точками 1–4. Как следствие, падения напряжения между точками 2–3 и 3–4 также равны между собой. На основании этих равенств можно определить измеряемое сопротивление  $R_x$ , зная известные сопротивления  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ .

$$R_x = R_4 \cdot \frac{R_2}{R_3} \quad (1.7)$$

измерений. Например, для измерения емкости  $C_x$  на высоких частотах используется резонансный измеритель контурного типа.

Упрощенная структурная схема такого измерителя в режиме измерения  $C_x$  приведена на рисунке 1.3.

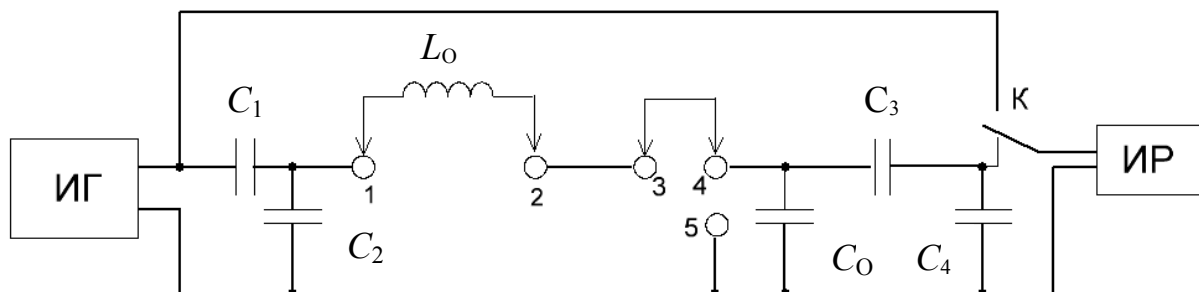


Рисунок 1.3 – Упрощенная структурная схема резонансного измерителя

В простейшем случае достаточно образовать колебательный контур из  $C_x$  и образцовой катушки индуктивности  $L_0$  ( $C_x$  подключается к зажимам 4–5, емкость регулируемого образцового конденсатора  $C_0$  устанавливается на минимальное значение), настроить контур в резонанс по показанию индикатора резонанса ИР изменением частоты измерительного генератора ИГ и, отсчитав значение резонансной частоты ( $f_p$ ) по шкале ИГ, определить  $C_x$  по известной формуле

$$C_x = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_p \cdot L_0} \quad (1.8)$$

Однако при таком способе измерения существенное влияние на точность измерения оказывают паразитные параметры контура (особенно паразитные емкости) и мы фактически измеряем не  $C_x$ , а емкость контура. Поэтому при измерении  $C_x$  резонансный метод сочетают с методом замещения.

При использовании этого сочетания после установки требуемой частоты ИГ настраивают в резонанс контур, образованный  $C_0$  и  $L_0$ , изменяя  $C_0$  до значения  $C_{01}$ . Затем к зажимам 4–5 подключают  $C_x$  и вновь настраивают контур в резонанс на той же частоте, уменьшая  $C_0$  от значения  $C_{01}$  до значения  $C_{02}$ . Очевидно, в этом случае

$$C_x = C_{01} - C_{02}, \quad (1.9)$$

Систематические погрешности, обусловленные паразитными емкостями контура, исключаются из результата измерения  $C_x$ , так как они входят с одинаковыми значениями и знаками в  $C_{01}$  и  $C_{02}$ .

*Метод совпадений* – это метод сравнения с мерой, при котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

Например, по принципу метода совпадения построен нониус штангенциркуля и ряда других приборов. Шкала нониуса штангенциркуля имеет десять

делений по 0,9 мм. Когда нулевая отметка шкалы нониуса окажется между отметками основной шкалы штангенциркуля, это будет означать, что к целому числу миллиметров следует прибавить некоторое число  $x$  десятых долей миллиметра (рисунок 1.4). Так как измеряемая дробная часть миллиметра  $0,1 \cdot x$  равна разности между целым числом миллиметров по основной шкале штангенциркуля ( $n$  мм) и расстоянием по шкале нониуса от нулевой до совпадающей отметки, равного  $0,9 \cdot n$  мм, можно записать  $0,1 \cdot x = n - 0,9 \cdot n = 0,1 \cdot n$ , т. е.  $x = n$ . Следовательно, порядковый номер совпадающей отметки нониуса непосредственно дает число десятых долей миллиметра. На рисунке 1,4  $n = 7$  и  $0,1 \cdot x = 0,7$  мм.

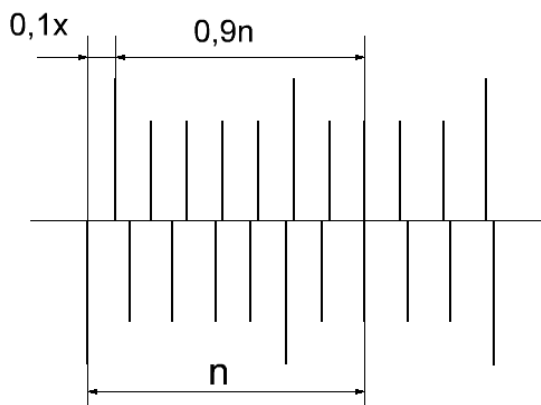


Рисунок 1.4 – Отсчетные шкалы штангенциркуля

Принцип совпадений периодических сигналов лежит в основе методов измерений, в которых используются явления биений, интерференции, а также стробоскопический эффект.

В зависимости от метода измерений, свойств применяемых средств измерений, объекта исследования и других факторов измерения могут выполняться либо с *однократными*, либо с *многократными* наблюдениями.

*Наблюдением* при измерении называется экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение величины (отсчет) – *результат наблюдения*. Для получения результата измерения результаты наблюдений необходимо соответствующим способом обработать. От числа наблюдений зависит способ обработки экспериментальных данных и оценка погрешностей результатов измерений.

## 1.6 Основные положения теории шкал измерений

Измерению и оцениванию подлежат различные проявления свойств тел, веществ, явлений, процессов – объектов, которые описываются принятыми моделями.

*Математическая модель объекта измерения* – совокупность математических символов (образов) и отношений между ними, которая адекватно описывает интересующие человека свойства объекта измерения.

Некоторые свойства при этом проявляются количественно, а другие – качественно. Многообразие проявлений любого свойства образует множество, отображение элементов которого на упорядоченные множества чисел или, в более общем случае, на систему условных знаков *образует шкалу измерения* этого свойства. Системами знаков являются, например, множество обозначений (названий) цветов, совокупность классификационных символов или понятий, множество баллов оценки состояний объекта, множество действительных чисел и т. д. Элементы множеств проявлений свойств находятся в определенных ло-

гических соотношениях между собой. Такими соотношениями могут быть «эквивалентность» (равенство) или «сходство» (близость) этих элементов, их количественная различимость («больше», «меньше»), допустимость выполнения определенных математических операций (сложения, вычитания, умножения, деления) с элементами множеств и т. д. Эти особенности элементов множеств проявления свойств определяют типы шкал измерений.

*Шкалой измерений (шкалой)* называется отображение множества различных проявлений качественного или количественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений).

Для измерения и оценивания различных объектов, явлений, процессов в метрологии и квалиметрии используют различные шкалы (не следует отождествлять с понятием «шкала отсчетного устройства средства измерений»). В соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал измерений: наименования, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные шкалы. Каждый из этих типов шкал обладает определенными признаками.

*Шкала наименований* (шкала номинального типа, классификационная шкала) – это тип шкалы, значения которой используют для выявления различий между объектами или их идентификации.

Шкалы наименований отражают качественные свойства, в том числе комбинированные свойства. Их элементы характеризуются только соотношениями эквивалентности (равенства) и сходства конкретных качественных проявлений свойств.

Классическим примером такой шкалы является шкала классификации (оценки) цвета объектов по наименованиям (красный, оранжевый, желтый, зеленый и т. д.), опирающаяся на стандартизованные атласы наборов цветов, систематизированных по сходству. В таких атласах, выполняющих роль своеобразных эталонов, цвета могут обозначаться условными номерами. Измерения в шкале цветов выполняются сравнением при определенном освещении образцов цвета из атласа с цветом исследуемого объекта и установления эквивалентности их цветов.

В принципе любая классификационная система, например, классификация растений и животных по Линнею, соответствует понятию шкалы наименований, но лишь некоторые из них представляют интерес для инструментальной метрологии. Шкалами наименований также являются: классификация кристаллов по группам симметрии; шкала обозначения городских телефонных номеров; шкала обозначений элементов принципиальной схемы радиоэлектронных изделий (спецификация) и др. Символы  $1, 2, 3, \dots, n$ , используемые в качестве шкальных значений, являются не числами, а цифрами и предназначены для обозначения объектов, т. е. они выполняют ту же функцию, что и наименования, и с ними нельзя вести арифметические действия.

В шкалах наименований нельзя ввести понятия единицы измерений; в них отсутствует и нулевой элемент; отсутствуют и понятия «больше» или

«меньше» нуля. Однако некоторые шкалы наименований могут содержать в себе количественные компоненты соответствующих качественных свойств.

Тем не менее, шкалы наименований всегда в целом, по существу, качественны, хотя возможны некоторые статистические операции при обработке результатов измерений в этих шкалах, например, можно найти модальный или наиболее многочисленный класс эквивалентности.

*Шкала порядка* (ранговая шкала) – это тип шкалы, в соответствии с которой размеры измеряемых величин располагают в порядке возрастания или убывания.

Шкалы порядка описывают свойства, для которых имеют смысл не только соотношения эквивалентности, но и соотношения порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. Они используются в случаях, когда нужно упорядочить качественные показатели объектов, в том числе зависящие от времени или пространства, но при этом не требуется их точного измерения, или когда какое-либо качество в принципе измеримо, но в необходимый момент нет практической или теоретической возможности реализовать это измерение. Так, например, на многих конкурсах и соревнованиях мастерство исполнителей и спортсменов определяется их местом, занятым в итоговой таблице. Последнее, таким образом, является шкалой порядка – формой представления измерительной информации, отражающей тот факт, что мастерство одних выше мастерства других, хотя и неизвестно в какой степени (насколько и во сколько раз). Построив людей по росту, можно, пользуясь шкалой порядка, сделать вывод о том, кто выше кого, однако сказать, насколько выше, нельзя. Процесс расстановки размеров в порядке их возрастания или убывания с целью получения измерительной информации по шкале порядка называется *ранжированием*.

Для облегчения измерений по шкале порядка некоторые точки на ней можно зафиксировать в качестве опорных (*реперных*). Знания, например, измеряют по реперной шкале порядка, имеющей следующий вид: неудовлетворительно, хорошо, отлично. Точкам реперной шкалы могут быть поставлены в соответствие цифры, называемые баллами. Например, интенсивность землетрясений измеряется по двенадцатибалльной международной сейсмической шкале *MSK-64*, сила ветра – по шкале Бофорта. По реперным шкалам измеряются также сила морского волнения, твердость минералов, чувствительность фотопленок и многие другие величины. Особенно широкое распространение реперные шкалы получили в гуманитарных науках, спорте, искусстве.

Недостатком реперных шкал является неопределенность интервалов между реперными точками. Поэтому с баллами нельзя производить математические действия (складывать, вычитать, перемножать, делить и т. п.). В шкалах порядка нельзя ввести единицы измерений, так как они нелинейны и вид нелинейности не всегда известен на отдельных участках. Такие числа являются неархимедовыми величинами. Шкалы порядка допускают монотонные преобразования, в них может быть или отсутствовать нулевой элемент. Более совер-

шенными в этом отношении являются шкалы, составленные из строго определенных интервалов.

*Шкала разностей (интервалов)* – отличается от рассмотренных качественных шкал наименований и порядка тем, что для описываемых ими свойств имеют смысл не только соотношения эквивалентности и порядка, но и суммирование интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойств. На такой шкале откладываются разность значений величины, а сами значения остаются неизвестными. Характерным примером шкалы разностей является шкала интервалов времени. Например, периоды работы, периоды учебы, интервалы отдыха. Их можно складывать и вычитать, но бессмысленно складывать и вычитать даты каких-либо событий.

Другие примеры: общепринятым, например, является измерение времени по шкале, разбитой на интервалы, равные периоду обращения Земли вокруг Солнца. Эти интервалы (годы) делятся в свою очередь на более мелкие (сутки), равные периоду обращения Земли вокруг своей оси. Сутки в свою очередь делятся на часы, часы на минуты, минуты на секунды; шкала длин (расстояний), т. е. пространственных интервалов, определяется совмещением нуля линейки с одной точкой, а отсчет делается у другой точки.

Шкалы разностей состоят из одинаковых интервалов и имеют условные (принятые по соглашению) единицы измерений и условные нули, опирающиеся на какие-либо реперы. Так, при любом летоисчислении коренной перелом в ходе второй мировой войны произошел под Сталинградом спустя 700 лет после разгрома Александром Невским немецких рыцарей Ливонского ордена на льду Чудского озера. Но если поставить вопрос о том, «во сколько раз» позже наступило это событие, то окажется, что по нашему григорианскому стилю – в  $1942/1242 = 1,56$  раза, по юлианскому календарю, отсчитываемому время от «сотворения мира», – в  $7448/6748 = 1,10$  раза, по иудейскому, где время отсчитывается «от сотворения Адама», – в  $5638/4938 = 1,14$  раза, а по магометанскому летоисчислению, начатому с даты переселения Магомета из Мекки в священный город Медину, – в  $1320/620 = 2,13$  раза. Следовательно, сказать по шкале интервалов, во сколько раз один размер больше или меньше другого, нельзя. Это объясняется тем, что по шкале интервалов известен масштаб, а начало отсчета может быть выбрано произвольно.

Шкалы интервалов иногда получают путем пропорционального деления интервала между двумя реперными точками. Так, на температурной шкале Цельсия один градус является сотой частью интервала между температурой таяния льда, принимаемой за начало отсчета, и температурой кипения воды. На температурной шкале Реомюра этот же интервал разбит на 80 градусов, а на температурной шкале Фаренгейта – на  $180^{\circ}\text{C}$ , причем начало отсчета сдвинуто на  $32^{\circ}\text{C}$  по Фаренгейту в сторону низких температур. Переход от шкалы Цельсия к шкале температур по Фаренгейту происходит в соответствии с линейным законом:  $\varphi(x) = a \cdot x + b$ , т. е.  $1^{\circ}\text{F} = 1,81^{\circ}\text{C} + 32$ .

Из приведенного примера следует, что при переходе к эквивалентной шкале с помощью линейных преобразований в шкале интервалов происходит

измерение как начала отсчета ( $b$ ), так и масштаба измерений ( $a$ ). В целом шкала интервалов описывается уравнением вида

$$A = n [A] + A_0, \quad (1.10)$$

где  $A_0$  – начало отсчета шкалы;  $[A]$  – единица рассматриваемой величины;  $n$  – числовое значение величины.

В шкалах разностей (интервалов) допустимы линейные преобразования, в них применимы процедуры для отыскания математического ожидания и стандартного отклонения. Они допускают изменение спецификаций и даже определений единиц измерений.

*Шкалу отношений (подобия)* принято рассматривать как шкалу разностей с естественным началом отсчета. Шкалы отношений отличаются от шкал разностей тем, что в них существуют естественные нули, которые соответствуют логически однозначному пределу бесконечно малого проявления количественного свойства. К множеству количественных проявлений в этих шкалах применимы соотношения эквивалентности и порядка, операции вычитания и умножения (шкалы отношений 1-го рода – пропорциональные шкалы), а во многих случаях и суммирования (шкалы отношений 2-го рода – аддитивные шкалы).

В шкалах отношений существуют условные (принятые по соглашению) единицы и естественные нули. Шкалами отношений являются шкалы массы (2-го рода), термодинамическая температурная шкала (1-го рода). Массы любых объектов можно суммировать, но суммировать температуры разных тел нет смысла, хотя можно судить о разности и отношении их термодинамических температур. Примером шкалы отношений является температурная шкала Кельвина. В ней за начало отсчета принят абсолютный нуль температуры, при котором прекращается тепловое движение молекул. Более низкой температуры быть не может. Второй реперной точкой служит температура таяния льда. По шкале Цельсия интервал между этими реперными точками приблизительно равен 273 градусам. Поэтому шкалу Кельвина делят на 273 равные части, каждая из которых называется Кельвином и равна градусу Цельсия, что значительно облегчает переход от одной шкалы к другой.

Переход от одной шкалы отношений к другой, эквивалентной ей шкале, осуществляется с помощью преобразования подобия, т. е. изменением масштаба измерений. Таким образом, шкала отношений описывается уравнением вида (1.3).

Шкала отношений является наиболее совершенной из всех рассмотренных шкал. На ней определено наибольшее число математических операций: сложение, вычитание, умножение, деление. Но, к сожалению, построение шкалы отношений возможно не всегда. Время, например, может измеряться только по шкале интервалов.

При оценивании изменяющихся показателей качества по шкале отношений динамика положительных изменений, т. е. повышения качества по сравнению с исходным, отображается в значениях больше единицы, а при снижении качества – меньше единицы.

Шкалы отношений широко используются в физике и технике.

*Абсолютные шкалы* – это шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений и имеющие дополнительно свой признак – естественное однозначное определение единицы измерений. Такие шкалы используются для измерений безразмерных скалярных счетных и относительных величин (отношений одноименных величин: коэффициентов усиления, ослабления; КПД; коэффициентов отражений, пропусканий и поглощений; добротности; глубины модуляции; коэффициентов трения покоя и скольжения, коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием и т. д.). Их единицы безразмерны и сочетаются с единицами любых систем, являясь, по сути дела, всесистемными или надсистемными. Такие шкалы также используются как варианты представления шкал отношений делением соответствующих величин на некоторые опорные значения этих величин, выраженные в принятых единицах (так получаются условно безразмерные величины).

Абсолютные шкалы бывают ограниченными (КПД) и неограниченными (коэффициент усиления), непрерывными и дискретными. Логическая структура большинства абсолютных шкал такова, что значения в них не аддитивны, а лишь пропорциональны. В некоторых случаях их можно перемножать. Аддитивными абсолютными шкалами являются шкалы плоских и телесных углов, количества информации, счетных величин. Изменения спецификаций допустимы и для абсолютных шкал введением единиц измерений, кратных или дольных естественной единице, но необходимость в этом, как правило, не возникает.

Так как для шкал наименований и порядка нет возможности ввести единицу измерений, то их принято называть условными шкалами. Для шкал разностей, отношений и абсолютных имеется возможность введения единицы измерения, поэтому их называют метрическими (физическими).

Необходимо отметить также, что шкалы наименований, порядка и абсолютные могут быть реализованы без специальных эталонов, а большинство шкал разностей и отношений – только посредством специальных эталонов.

Диапазоны практически используемых значений большинства измеряемых величин и явлений весьма велики. Даже в обыденной жизни человек сталкивается с одноименными величинами, во много раз различающимися между собой. Например, интенсивность звуков, воспринимаемых ухом человека от порога слуха до болевого порога различаются в миллион раз. Коэффициенты усиления или ослабления электрических сигналов могут достигать нескольких миллионов. Психологические особенности человека, выполняющего операции с числами, таковы, что натуральные числа, содержащие более трех-четырёх значащих цифр, уже плохо воспринимаются и запоминаются, требуют напряжения при осмыслении полученных результатов.

В то же время характеристика, например, десятичного логарифма натуральных чисел, вплоть до  $10^9$ , выражается однозначным числом, что во многих случаях весьма наглядно и удобно. Это свойство логарифмирования часто используется для представления в логарифмическом масштабе результатов измерений в метрических шкалах разностей, отношений и абсолютных шкал.



Логарифмические шкалы удобны еще тем, что приращение уровня реакции (ощущения) человека на физические внешние раздражители – звук, свет и др. – примерно пропорциональны логарифму величины, характеризующей стимулирующий фактор, они широко используются для построения так называемых *биофизических шкал*.

Логарифмирование метрических и абсолютных шкал приводит к изменению типа шкалы. Так например, пропорциональные абсолютные шкалы в логарифмическом варианте становятся аддитивными; коэффициенты усиления последовательно включенных усилителей перемножаются, а их логарифмы складываются. При логарифмическом преобразовании шкал отношений и разностей получается логарифмическая шкала разностей с фиксированным нулем, соответствующим принятому опорному значению преобразуемой шкалы.

## 2 Средства измерений электрических величин

### 2.1 Общая характеристика средств измерений

В соответствии с Законом «Об обеспечении единства измерений», *средство измерений* (СИ) – это техническое средство, предназначенное для измерений, воспроизводящее и (или) хранящее единицу измерения, метрологические характеристики, значения которых принимаются неизменными в течение определенного времени.

СИ является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные конструктивно законченные устройства, которые реализуют одну из двух функций:

– воспроизводят величину заданного (известного) размера, например, гиря – заданную массу, магазин сопротивлений – ряд дискретных значений сопротивления;

– вырабатывают сигнал (показание), несущий информацию о значении измеряемой величины. Показания СИ либо непосредственно воспринимаются органами чувств человека (например, показания стрелочного или цифрового приборов), либо они не доступны восприятию человеком и используются для преобразования другими СИ.

По функциональному назначению СИ подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные установки и измерительные системы.

*Мера* – это СИ, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера с необходимой точностью. Мера необходима при реализации всех модификаций метода сравнения, т. к. именно с помощью меры получают величину, значение которой известно. В качестве меры в радиоизмерениях, в частности, используются: частота колебаний кварцевого генератора – мера частоты электрических колебаний; измерительный резистор – мера элек-

трического сопротивления; измерительный конденсатор – мера электрической емкости. Меры могут быть однозначными и многозначными.

*Однозначная мера* воспроизводит физическую величину одного определенного размера. Например, измерительный резистор, измерительный конденсатор постоянной емкости, ЭДС нормального элемента, образцовая катушка индуктивности.

*Многозначная мера* воспроизводит ряд одноименных величин различного размера. Например, потенциометр (переменный резистор), вариометр индуктивностей, конденсатор переменной емкости. Специально подобранный комплект мер, применяемых не только в отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных величин различного размера, называется *набором мер*. Например, набор измерительных резисторов или конденсаторов.

*Измерительный прибор* – СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации (измерительного сигнала) в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (оператором). Информация о свойствах и качествах объектов, полученная посредством измерений, называется *измерительной информацией*. Именно измерительная информация является основой для принятия технических и управленческих решений при испытаниях продукции, оценивании ее технического уровня, аттестации и подтверждения соответствия.

В радиотехнике вообще и в радиоэлектронике и телекоммуникациях в частности сигналом измерительной информации является, как правило, электрический сигнал, который функционально связан с измеряемой физической величиной. Измерительные приборы – самый распространенный и можно сказать основной вид СИ, применяемых на практике для конкретных измерений различных величин.

*Измерительный преобразователь* – СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительные преобразователи имеют нормированные метрологические характеристики и могут как входить в состав измерительных приборов, так и применяться самостоятельно. Сопряжение со средствами измерений и использование в измерительных системах обычно предъявляет к измерительным преобразователям жесткие требования по унификации и стандартизации.

В зависимости от места в измерительной цепи различают первичные и промежуточные преобразователи.

*Первичный преобразователь* – измерительный преобразователь, к которому подведена измеряемая величина, т. е. первый в измерительной цепи. Например, термопара в цепи термоэлектрического измерителя мощности. Если первичные преобразователи размещаются непосредственно на объекте исследования, удаленном от места обработки информации, то они иногда называются *датчиками*. В зависимости от вида входного и выходного сигналов преобра-

зователи подразделяются на *аналоговые, аналогово-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП)*.

Широко применение в СИ получили масштабные измерительные преобразователи.

*Масштабный преобразователь* – измерительный преобразователь, который предназначен для изменения величины в заданное число раз. Например, измерительный трансформатор, делитель напряжения, измерительный усилитель, аттенюатор, шунты, добавочные резисторы.

Для категории средств измерений, охватывающей измерительные приборы и измерительные преобразователи, допускается применять термин «*измерительные устройства*».

*Вспомогательное средство измерений* – СИ величин, влияющих на метрологические свойства другого СИ при его применении или поверке. К ним относятся, например, СИ, применяемые для контроля внешних условий (температуры, давления и т. п.) при выполнении измерений другими СИ или при их поверке.

В комплект некоторых СИ входят принадлежности, которые могут оказывать влияние на метрологические свойства СИ. К принадлежностям относятся: градуировочные графики, таблицы, номограммы, соединительные кабели с нормированными коэффициентами отражения и затухания и др. Сами принадлежности средствами измерений не являются.

*Измерительная установка* — совокупность функционально объединенных СИ (мер, измерительных приборов, ИП) и вспомогательных устройств (сопряжения, питания и др), предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте. Электрорадиотехнические установки используют, например, для исследования электрических характеристик и параметров сложных электрорадиотехнических устройств.

*Измерительная система* – совокупность СИ и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

По метрологическому назначению все СИ дифференцируются на эталоны, рабочие эталоны и рабочие СИ.

*Эталон* – СИ (или комплекс СИ), утвержденное в соответствии с правилами, установленными Госстандартом Республики Беларусь, в качестве эталона единицы величины. Они выполняются по особой спецификации и официально утверждаются в установленном порядке в качестве эталона. Эталоны классифицируют по ряду признаков: по точности воспроизведения единиц и подчиненности различают *первичные, вторичные, специальные эталоны*. По назначению их разделяют на *эталон-копии, эталоны сравнения, эталоны-свидетели и рабочие эталоны*.

*Рабочий эталон* — эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим СИ. Эквивалентное ему старое название этого термина – образцовое СИ.

*Рабочее СИ* – СИ, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

## 2.2 Погрешности средств измерений

### 2.2.1 Определения и формы представления погрешностей СИ

При использовании СИ всегда имеют место погрешности, которые обусловлены несовершенством самих СИ. Так, показания измерительного прибора отличаются от действительного значения измеряемой величины, значение величины, воспроизводимой мерой, отличается от номинального значения меры, действительная характеристика преобразователя отличается от его номинальной. Это отличие и называют погрешностью средства измерения.

Таким образом: *погрешность СИ* (измерительного прибора) – это отклонение показания СИ  $X_{\Pi}$  от истинного значения измеряемой величины  $Q$ . *Показание СИ* – это значение величины, определяемое по отсчетному устройству СИ. Не следует отождествлять погрешность СИ и погрешность результата измерения. Погрешность СИ является свойством конкретного СИ, которое присуще только ему, даже если СИ не используется, и которое регламентируется стандартами в виде нормируемых метрологических характеристик СИ. Знание этих характеристик позволяет при рабочих измерениях приближенно оценивать границы погрешности результата измерения, если другими ее составляющими можно пренебречь.

Как и погрешность результатов измерений, погрешность СИ можно классифицировать по ряду признаков. По способу выражения (абсолютная, относительная, приведенная) и по характеру проявления (случайная, систематическая). Погрешности измерений и погрешности СИ имеют одинаковую природу. Абсолютная ( $\Delta_{\Pi}$ ) и относительная ( $\delta_{\Pi}$ ) погрешности СИ определяются по аналогичным формулам для погрешностей результатов измерений, только в них вместо результата измерения  $X$  должна фигурировать величина  $X_{\Pi}$  – показание СИ.

*Абсолютная погрешность СИ* (измерительного прибора) – это разность между показанием измерительного прибора  $X_{\Pi}$  и истинным значением измеряемой величины  $Q$ :

$$\Delta_{\Pi} = X_{\Pi} - Q \quad . \quad (2.1)$$

Абсолютные погрешности, не зависящие от измеряемой величины, называются *аддитивными*, а зависящие от измеряемой величины – *мультипликативными*.

*Относительная погрешность СИ* (измерительного прибора) – это отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к истинному значению измеряемой им величины:

$$\delta_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{Q}. \quad (2.2)$$

$$\delta_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{Q} \cdot 100 \%. \quad (2.3)$$

*Приведенная погрешность СИ* (измерительного прибора) определяется как отношение абсолютной погрешности к некоторому нормирующему значению  $X_N$  и выражается в процентах:

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{X_N} \cdot 100 \%. \quad (2.4)$$

Приведенная погрешность введена, в первую очередь, для характеристики показателей точности СИ, диапазон измеряемых величин которых включает и нулевое значение, так как если измеряемая величина приближается к нулю, то  $\delta_{\text{п}}$  любого СИ независимо от точности стремится к бесконечности. Кроме того,  $\gamma_{\text{п}}$  позволяет в отличие от  $\Delta_{\text{п}}$  и  $\delta_{\text{п}}$  выявить потенциальные возможности СИ в плане минимизации инструментальной составляющей погрешности результата измерения.

*Нормирующее значение  $X_N$*  – это условно принятое значение, которое может быть равным верхнему пределу измерений, диапазону измерений, длине шкалы и др. Правила выбора  $X_N$  регламентируются стандартом.

Для средств измерений с равномерной (практически равномерной) шкалой (шкала с постоянной ценой деления, т. е. длина делений которой отличается друг от друга не более чем на 30 %) или степенной шкалой, нормирующее значение  $X_N$  устанавливают следующим образом:

- равным пределу измерений, если нулевое значение находится на краю или вне диапазона измерений;
- равным большему из модулей пределов измерений, если один значительно превышает другой;
- сумме модулей пределов измерений, если они равны или отличаются незначительно, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений;
- модулю разности пределов измерений.

Для СИ с установленным номинальным значением  $X_N$  равно этому номинальному значению.

Для СИ с существенно неравномерной шкалой  $X_N$  равно длине рабочего участка шкалы. Существенно неравномерная шкала – шкала с сужающимися делениями, для которой значение выходного сигнала, соответствующее полу-сумме верхнего и нижнего пределов диапазона измерений входного (выходного) сигнала находится в интервале между 65 и 100 % длины шкалы, соответствующей диапазону измерений входного (выходного) сигнала. В этом случае абсолютную погрешность выражают, как и длину шкалы, в единицах длины.

Погрешность СИ включает целый ряд систематических и случайных составляющих и зависит от условий его эксплуатации. Причинами случайных погрешностей могут быть: случайные изменения параметров конструктивных

элементов СИ; случайное изменение отсчета по шкале прибора и др. Случайные составляющие погрешности СИ приводят к неоднозначности показаний. Поэтому случайные составляющие погрешности СИ стараются сделать незначительными по сравнению с другими составляющими. Серийные измерительные приборы обладают этим свойством. Однако в приборах высокой точности случайная составляющая может быть соизмерима с систематической.

Причинами возникновения систематических погрешностей могут быть: действие различных дестабилизирующих факторов в процессе измерения; технологические ошибки в процессе изготовления СИ; ошибки при подготовке измерительных приборов к проведению измерений; старение и износ конструктивных элементов СИ и др.

Систематическая погрешность СИ, как и результата измерения, является величиной постоянной или закономерно изменяющейся и поэтому может быть выявлена, оценена и исключена из результатов измерения, полученных с помощью этого СИ. Однако таковой ее можно считать только для одного экземпляра СИ. Реально в соответствии с нормативными документами систематическая погрешность определяется для совокупности СИ одного типа. Следовательно, систематические погрешности каждого экземпляра будут случайным образом отличаться друг от друга, а, следовательно, систематическая погрешность всей совокупности СИ должна рассматриваться как случайная величина.

Погрешность СИ, используемого в нормальных условиях, называется *основной погрешностью СИ*. Изменение погрешности СИ, вызванное отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области, называется *дополнительной погрешностью СИ*. Обычно дополнительная погрешность указывается для каждой из влияющих величин. Нормальные значения (нормальные области значений) влияющих величин и допускаемые отклонения от них установлены ГОСТ 22261.

### 2.2.2 Нормирование погрешностей СИ

Погрешности СИ нормируются установлением пределов допускаемых основной и дополнительной погрешностей. Способы нормирования и формы представления этих пределов должны быть установлены в стандартах и (или) технических условиях на конкретные СИ. Пределы допускаемых основных погрешностей выражают в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения СИ конкретного вида. Пределы допускаемой дополнительной погрешности допускается выражать в форме, отличной от формы выражения пределов допускаемой основной погрешности.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины или условно в делениях шкалы, если погрешность имеет аддитивный характер, устанавливаются по формуле

$$\Delta_{\text{п}} = \pm a, \quad (2.5)$$

или, если погрешность имеет соизмеримые аддитивную или мультипликативную составляющие, по формуле

$$\Delta_{\text{п}} = \pm(a + b \cdot X), \quad (2.6)$$

где  $\Delta_{\text{п}}$  – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности;  $a$  и  $b$  – положительные числа, не зависящие от  $X$ ,  $X$  – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанное по шкале;

С точки зрения точности  $a$  – остаточная погрешность, величина которой определяется выбранным методом измерения, а  $b \cdot X$  – так называемая погрешность чувствительности СИ. Величина этих составляющих определяется стандартами на конкретные СИ.

Пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливаются по формулам:

– если  $\Delta_{\text{п}}$  задается формулой (2.5), то

$$\delta_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{X} \cdot 100 \% = \pm q; \quad (2.7)$$

– если  $\Delta_{\text{п}}$  задается формулой (2.6), то

$$\delta_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{X} \cdot 100 \% = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{X_k}{X} \right| - 1 \right) \right], \quad (2.8)$$

где  $\delta_{\text{п}}$  – пределы допускаемой относительной основной погрешности;  $X_k$  – больший (по модулю) из пределов измерений;  $q$ ,  $c$  и  $d$  – положительные числа, выбираемые из ряда

$$(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \cdot 10^n, \quad n = 1, 0, -1, -2, \dots \quad (2.9)$$

$$c = b + d; \quad d = \frac{a}{X_k}. \quad (2.10)$$

Соотношение между числами  $c$  и  $d$  устанавливают в стандартах на конкретные СИ. Кроме того, в них должно быть установлено минимальное значение  $X$ , равное  $X_0$ , начиная от которого применим принятый способ выражения пределов допускаемой основной относительной погрешности.

В обоснованных случаях  $\Delta_{\text{п}}$  и  $\delta_{\text{п}}$  могут устанавливаться по более сложным формулам или в виде графика (таблицы). В частности, согласно ГОСТ 22261 допускается значение  $\delta_{\text{п}}$  выражать в децибелах по формуле

$$\delta_{\text{п}} = A \cdot \lg \left( 1 + \frac{\Delta_{\text{п}}}{X} \right), \quad (2.11)$$

где  $A = 10$  при измерении мощности, энергии, плотности энергии и других энергетических величин и  $A = 20$  при измерении напряжения, силы тока, напряженности электрического поля и других электрических величин.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности устанавливаются по формуле

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{X_N} \cdot 100 \% = \pm p, \quad (2.12)$$

где  $p$  – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда (2.9).

Если границы абсолютных погрешностей можно полагать практически неизменными в диапазоне измерений, то пределы допускаемых основных погрешностей устанавливаются по формулам (2.5), (2.7) и (2.12). Если же их можно полагать изменяющимися практически линейно, то по формулам (2.6) и (2.8), в которых первые слагаемые характеризуют аддитивную (не зависящую от  $X$ ), а вторые – мультипликативную (зависящую от  $X$ ) составляющие погрешности СИ.

Выражение пределов допускаемой основной погрешности в форме приведенных и относительных погрешностей является предпочтительным, так как они остаются одинаковыми для СИ одного уровня точности, но с различными верхними пределами измерений.

Пределы допускаемых дополнительных погрешностей устанавливают:

- в виде постоянного значения для всей рабочей области влияющей величины или в виде постоянных значений по интервалам рабочей области влияющей величины;

- путем указания отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующего регламентированному интервалу влияющей величины, к этому интервалу;

- путем указания зависимости предела допускаемой дополнительной погрешности от влияющей величины (предельной функции влияния);

- путем указания функциональной зависимости пределов допускаемых отклонений от номинальной функции влияния.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности, как правило, устанавливают в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой погрешности.

Пределы допускаемой основной дополнительной погрешности должны быть выражены не более чем двумя значащими цифрами, причем погрешность округления при вычислении пределов должна быть не более 5 %.

### 2.2.3 Классы точности СИ

Обобщенной характеристикой СИ является класс точности. Он определяется пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами СИ, влияющими на точность, значения которых устанавливают в стандартах на конкретные виды СИ.

В соответствии с приведенным определением класс точности в общем случае определяется основными и дополнительными погрешностями. Однако если изменения погрешности во всей рабочей области значений влияющих величин составляют менее половины основной, то дополнительная погрешность может не учитываться. Если же это условие не выполняется, то пределы допускаемых дополнительных погрешностей устанавливают в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности.

Для обозначения классов точности используются прописные буквы латинского алфавита, римские и арабские цифры, которые наносят на шкалах или корпусах СИ и указывают в технической документации на эти средства. Способ



обозначения класса точности определяется формой выражения основной погрешности.

Примеры обозначения классов точности приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Примеры обозначения классов точности

Форма выражения погрешности	Способ нормирования основной погрешности	Предел допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности	
			в документации	на СИ
Абсолютная	По формулам (2.5) и (2.6) и др. более сложным формам	Указывается в нормативно-технической документации	Класс точности М Класс точности IV Класс точности B <sub>2</sub>	М IV B <sub>2</sub>
Относительная	По формуле (2.7) По формуле (2.8)	$\delta_{\text{п}} = \pm 2,5$ $\delta_{\text{п}} = \pm \left[ 0,02 + 0,01 \cdot \left( \left  \frac{X_k}{X} \right  - 1 \right) \right]$	Класс точности 2,5 Класс точности 0,02/0,01	$\textcircled{2,5}$ 0,02/0,01
	По одной из сложных форм	Указывается в нормативно-технической документации	Класс точности С Класс точности Н <sub>1</sub> Класс точности II	С Н <sub>1</sub> II
Приведенная	По формуле (2.12): $X_N$ выражено в единицах измеряемой величины	$\gamma_{\text{п}} = \pm 1,5$	Класс точности 1,5	1,5
	$X_N$ выражено в длине рабочего участка шкалы	$\gamma_{\text{п}} = \pm 4,0$	Класс точности 4,0	$\surd 4,0$

Если пределы допускаемой основной погрешности выражены в форме  $\Delta_{\text{п}}$  или одной из сложных форм  $\delta_{\text{п}}$ , то для обозначения классов точности применяются прописные буквы латинского алфавита или римские цифры. В необходимых случаях к обозначению класса точности буквами латинского

алфавита допускается добавлять индексы в виде арабской цифры. Классам точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей, должны соответствовать буквы, находящиеся ближе к началу алфавита, или цифры, означающие меньшие числа.

Если же эти пределы выражены в формах  $\gamma_{\text{п}}$  и по формуле (2.3) для  $\delta_{\text{п}}$ , то классы точности обозначают числами, которые равны этим пределам, выраженным в процентах. Если пределы выражаются значением  $\delta_{\text{п}}$  по формуле (2.8), то классы точности обозначаются числами  $c$  и  $d$ , через косую черту.

Если СИ имеет два и более диапазонов измерений или оно способно измерять несколько физических величин, то такое СИ может иметь разные классы точности для различных диапазонов и для каждой измеряемой величины.

Различают погрешности конкретного экземпляра СИ и погрешности типа СИ. Тип СИ – совокупность СИ, имеющих одинаковые устройства, функциональное назначение и нормируемые характеристики.

Погрешность конкретного СИ характеризует только данный экземпляр СИ. Такая погрешность обычно известна только для СИ, которые изготовлены в единичном экземпляре, или малой партией, или для калиброванных СИ. Погрешность типа СИ характеризует всю совокупность экземпляров данного типа. Погрешность любого экземпляра СИ данного типа не может превышать погрешность типа. Это устанавливается по результатам поверки. Для приборов массового производства указывается погрешность типа.

## 2.3 Классификация измерительных приборов

Наиболее распространенными средствами измерений, используемыми при электрорадиоизмерениях, являются измерительные приборы. Они разнообразны вследствие большого количества различных измерительных задач и требований, предъявляемых к ним.

Измерительные приборы представляют собой различное сочетание измерительных преобразователей, выполняющих определенные функции, и отсчетного устройства. Структурная схема измерительного прибора показывает функциональное взаимодействие его основных преобразователей и реализует математическое описание измеряемой физической величины.

По физическим явлениям, на которых основана их работа, измерительные приборы можно разделить на электроизмерительные и электронные (радиоизмерительные) приборы.

Электроизмерительные приборы, как правило, являются электромеханическими. В них энергия электромагнитного поля преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части прибора. Они классифицируются дополнительно в зависимости от способа этого преобразования электромагнитной энергии в механическую.

Электронные измерительные приборы представляют собой сложные устройства, содержащие большое число преобразователей, выполняющих функции генерирования, усиления, выпрямления, преобразования электрических сигналов

определенной формы, аналогового сигнала в дискретный и наоборот, сравнения, умножения, деления и др. Электронные приборы содержат активные (электронные лампы, диоды, транзисторы, микросхемы и др.) и пассивные (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) элементы.

Вся совокупность измерительных приборов может быть условно разбита на 4 большие группы:

- приборы для измерения параметров и характеристик электрических сигналов (амперметры, вольтметры, частотомеры, осциллографы и т. д.);
- приборы для измерения параметров и характеристик цепей (измерители сопротивлений, параметров микросхем, транзисторов и т. д.);
- источники измерительных сигналов (измерительные генераторы);
- элементы измерительных схем и цепей (преобразователи, циркуляторы, фазовращатели, направленные ответвители и т. д.).

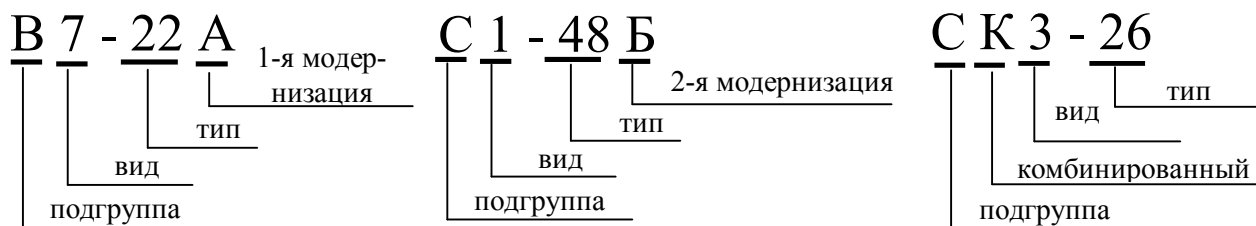
Более подробная классификация приборов всех групп и их обозначение регламентируется стандартом. В соответствии с ним все измерительные приборы в зависимости от характера измерений и вида измеряемых величин подразделяются на подгруппы, которым присваиваются буквенные обозначения.

Внутри каждой подгруппы приборы классифицируются по признакам основной выполняемой функции (по назначению) на виды, которым присваиваются буквенно-цифровые обозначения. Например, для вольтметров:

- В2 – постоянного тока;
- В3 – переменного тока;
- В4 – импульсные;
- В7 – универсальные.

Полное наименование прибора определяется наименованием вида, к которому прибор относится.

Внутри каждого вида приборы подразделяются по совокупности технических характеристик и очередности разработок на типы, которым присваивается порядковый номер модели. Для модернизированных приборов в конце обозначения ставятся в алфавитном порядке буквы, соответствующие очередной модернизации. Комбинированные приборы могут иметь двойное обозначение: после буквы, обозначающей подгруппу, следует буква К. Таким образом, полное обозначение прибора составляет из буквы (подгруппа), цифры (вид) и числа через дефис (тип прибора). Например:



По виду выдаваемой информации различают аналоговые и цифровые приборы.

*Аналоговый измерительный прибор* – измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины. В этих приборах непрерывная измеряемая величина вызывает подобное ей непрерывное отклонение указателя по шкале, т. е. аналоговая величина представляет собой подобие другой величины. К аналоговым приборам относятся приборы, у которых указатель жестко связан с подвижной частью измерительного механизма.

*Цифровой измерительный прибор (ЦИП)* – измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представляются в цифровой форме.

ЦИП имеет ряд преимуществ перед аналоговыми: удобство и объективность отсчета измеряемых величин; высокая точность результатов измерения и практически отсутствие промахов; широкий динамический диапазон при высокой разрешающей способности; высокое быстродействие из-за отсутствия подвижных электромеханических элементов; возможность автоматизации процесса измерения, включая автоматический выбор полярности и пределов измерений; возможность использования новейших достижений микроэлектроники при конструировании и изготовлении, в том числе внедрение микропроцессоров; удобство создания многофункциональных измерительных приборов, так называемых мультиметров, которые измеряют несколько физических величин (как электрических, так и неэлектрических); высокая устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям.

В таблице 2.2 приведена классификация электрорадиоизмерительных приборов на подгруппы.

Таблица 2.2 – Классификация измерительных приборов на подгруппы

№ п/п	Наименование подгруппы	Обозначение
1	Приборы для измерения силы тока	А
2	Приборы для измерения напряжения	В
3	Приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными	Е
4	Приборы для измерения мощности	М
5	Приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными	Р
6	Приборы для измерения частоты и времени	Ч
7	Приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания	Ф
8	Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра	С
9	Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств	Х

Продолжение таблицы 2.2

№ п/п	Наименование подгруппы	Обозначение
10	Приборы для импульсных измерений	И
11	Приборы для измерения напряженности поля и радиопомех	П
12	Усилители измерительные	У
13	Генераторы измерительные	Г
14	Аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений	Д
15	Комплексные установки	К
16	Приборы для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов	Л
17	Приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов	Ш
18	Блоки радиоизмерительных приборов	Я
19	Измерительные радиоустройства коаксиальных и волноводных трактов	Э
20	Источники питания для измерений и радиоизмерительных приборов	Б

В зависимости от способа преобразования сигнала измерительной информации измерительные приборы подразделяются на следующие:

– *измерительные приборы прямого преобразования* – измерительные приборы, в которых предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала информации в одном направлении, т. е. без применения цепей обратной связи (амперметр, вольтметр, частотомер и т. д.);

– *измерительные приборы сравнения* – измерительные приборы, в которых предусмотрено непосредственное сравнение измеряемой величины с известной величиной при наличии цепи обратной связи (потенциометр постоянного тока, вольтметр, измерительный мост и т. д.).

В зависимости от способа усреднения измеряемой величины выделяют:

– *интегрирующие измерительные приборы* – измерительные приборы, в которых измеряемая величина интегрируется по времени или по другой независимой переменной;

– *неинтегрирующие измерительные приборы* – измерительные приборы, в которых измеряются мгновенные значения измеряемой величины;

– *суммирующие измерительные приборы* – измерительные приборы, показания которых функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к ним по различным каналам.

В зависимости от формы представления показаний измерительные приборы делятся на следующие:

– *показывающие приборы* – они допускают только считывание показаний;

– *регистрирующие приборы* – в них, кроме считывания показаний, предусматривается и их регистрация, которая может быть в форме диаграммы (самопишущие приборы) или распечатки в цифровой форме (печатающие приборы).

В зависимости от условий применения измерительные приборы делятся на следующие:

- приборы *общего применения*;
- приборы *специальные*, предназначенные для использования только в определенных условиях или объектах;
- приборы *встроенные*, т. е. конструктивно входящие в состав других различных устройств.

По характеру установки на месте применения приборы бывают *стационарными*, предназначенными для жесткого крепления, и *переносными*, не предназначенными для жесткого крепления.

В зависимости от степени защищенности от климатических и механических воздействий приборы выполняются обыкновенными, пыле-, водо-, брызгозащищенными, герметическими, вибро-, удароустойчивыми и др.

Более широкой является классификация измерительных приборов по конкретным признакам. Одним из основных признаков радиоизмерительных приборов служит диапазон (рабочая область) частот, в котором данный прибор работает или сохраняет нормированные метрологические характеристики. Выбирая измерительный прибор для эксплуатации в некотором частотном диапазоне, необходимо учитывать, что до настоящего времени имеется разночтение наименований диапазонов частот.

В ряде официальных нормативных документов на средства измерений и в литературе по электрорадиоизмерениям содержится традиционное деление на следующие диапазоны частот: инфранизких (ИНЧ) – до 20 Гц; низких (НЧ) – от 20 Гц до 300 кГц; высоких (ВЧ) – от 30 кГц до 300 МГц и сверхвысоких (СВЧ) – свыше 300 МГц.

Однако с другой стороны, решением Международного консультативного комитета по радио (МККР) рекомендована определенная система деления и наименований полос в спектре частот, применяемом для радиосвязи, радиовещания и телевидения, которая также используется особенно в последнее время. Согласно этой рекомендации различают следующие диапазоны частот: крайне низких (КНЧ) – (3–30) Гц; сверхнизких (СНЧ) – (30–300) Гц; инфранизких (ИНЧ) – (300–3000) Гц; очень низких (ОНЧ) – (3–30) кГц; низких (НЧ) – (30–300) кГц; средних (СЧ) – (300–3000) кГц; высоких (ВЧ) – (3–30) МГц; очень высоких (ОВЧ) – (30–300) МГц; ультравысоких (УВЧ) – (300–3000) МГц; сверхвысоких (СВЧ) – (3–30) ГГц; крайне высоких (КВЧ) – (30–300) ГГц; гипервысоких (ГВЧ) – (300–3000) ГГц.

Все эти разновидности измерительных приборов встречаются в настоящее время внутри каждой подгруппы и большинства видов.

## 2.4 Основные характеристики измерительных приборов

Для оценки свойств ИП и определения возможности их применения при эксплуатации служат характеристики ИП, всю совокупность которых можно условно разбить на две группы:

– технические характеристики – характеристики, не влияющие на точность измерений;

– метрологические характеристики – это характеристики, влияющие на результаты и погрешность измерений.

#### 2.4.1 Технические характеристики измерительных приборов

*Назначение* — это качественная характеристика ИП, показывающая, для измерения каких физических величин он предназначен. Она является основной при классификации всех видов измерительных приборов.

*Область применения* — это количественная характеристика, определяемая диапазонами возможного изменения измеряемых величин, неизмеряемых величин (неинформативные параметры входного сигнала ИП) и влияющих величин (климатические, механические и другие воздействия), в которых нормированы метрологические характеристики ИП.

*Надежность* — это количественная характеристика, определяющая свойства ИП выполнять заданные функции, сохраняя свои характеристики в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени. Основным показателем надежности является наработка на отказ.

*Эксплуатационные параметры* – требования к ним регламентируются ГОСТ 22261.

#### 2.4.2 Метрологические характеристики измерительных приборов

Совокупность метрологических характеристик ИП регламентируется ГОСТ 22261 и ГОСТ 8.009. В них метрологические характеристики представлены в общем виде. Поэтому на их основе конкретизируем характеристики ИП.

**А. Характеристики для определения результатов измерений.**

*Функция преобразования* (градуировочная характеристика, уравнение преобразования) – функциональная зависимость между информативными параметрами выходного  $Y$  и входного  $X$  сигналов средства измерений, т. е. и ИП

$$Y = F(X).$$

Функция преобразования позволяет определить значение измеряемой величины  $X$  в рабочих условиях по показаниям ИП  $Y$ , если ИП имеет наименованную шкалу или шкалу, проградуированную в единицах входной величины.

Функцию преобразования, применяемую для СИ и устанавливаемую в нормативной документации на данное средство измерения, называют *номинальной статической функцией преобразования средства измерения*. Она может быть представлена аналитически в виде уравнения, графически в виде графика или в виде таблицы. Для аналоговых измерительных приборов задание функции преобразования (градуировочной характеристики) означает градуи-

ровку шкалы прибора, т. е. нанесение отметок на шкалу прибора. Для цифровых измерительных приборов градуировочная характеристика представляется в виде последовательности чисел, высвечиваемых на табло. Идеальная функция преобразования представляет собой линейную зависимость, но под действием различных причин она становится нелинейной. Функция преобразования связывает конструктивные параметры ИП с его входным и выходным сигналами.

*Чувствительность* – это отношение изменения сигнала на выходе СИ ( $\Delta\alpha$ ) к вызвавшему его изменению измеряемой величины ( $\Delta X$ ). Различают *абсолютную чувствительность*

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X} \quad (2.13)$$

и *относительную чувствительность*, определяемую формулой

$$S_{\text{отн}} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X/X} \quad (2.14)$$

При линейной статической характеристике преобразования чувствительности постоянна  $S = \text{const}$ , шкала прибора равномерная, а при нелинейной характеристике  $S$  зависит от  $X$ . Величина, обратная чувствительности, называется постоянной прибора или ценой деления его шкалы:

$$C = \frac{1}{S} \quad (2.15)$$

Чувствительность и цена деления – величины именованные. Обычно говорят о чувствительности СИ к какой-то физической величине (напряжению, току и т. д.). Например:  $S = 5$  дел/В;  $C = 0,2$  А/дел.

Если шкала неравномерная, то нормируется минимальная цена деления.

*Предельная чувствительность* – минимальная величина исследуемого сигнала, подаваемого на вход прибора, которая необходима для получения отсчета с погрешностью, не превосходящей допустимую. Ее выражают в единицах исследуемого сигнала.

*Порог чувствительности* (порог реагирования) – наименьшее изменение измеряемой величины, которое вызывает изменение показания прибора, обнаруживаемое наблюдателем при нормальном для данного прибора способе отсчета, т. е. без дополнительных устройств. Он также выражается в единицах измеряемой величины.

*Разрешающая способность* – минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, которая может быть различима с помощью прибора.

*Диапазон измерений* – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности измерительного прибора. Эта область ограничена пределами измерений – наибольшим ( $X_{\text{max}}$ ) и наименьшим ( $X_{\text{min}}$ ) значениями диапазона измерений. Часто в измерительных приборах с целью повышения точности измерений общий диапазон измерений может быть разбит на несколько поддиапазонов со своими нормированными допускаемыми погрешностями.



*Диапазон показаний* – область значений шкалы, ограниченная ее начальным и конечным значениями. Этот диапазон может быть шире диапазона измерений.

*Отсчет* – число, определенное по отсчетному устройству прибора.

*Показание ИП* – значение измеряемой величины, определяемое по отсчетному устройству прибора и выраженное в принятых единицах этой величины. В некоторых случаях показания определяются с помощью отсчета по прилагаемой к прибору градуировочной характеристике, т. е. зависимости между отсчетом и значением величины на входе прибора, представленной в виде таблицы, графика или формулы.

*Длина деления шкалы* – расстояние между осями двух соседних отметок. Шкалы бывают равномерные, практически равномерные, степенные и существенно неравномерные.

**Б. Характеристики погрешности.**

*Область рабочих частот* (диапазон рабочих частот) – полоса частот, в пределах которой погрешность прибора, полученная при изменении частоты, не превышает допустимого предела.

*Время измерения* – время, прошедшее с момента изменения измеряемой величины или начала принудительного цикла измерения до момента получения нового результата измерения на отсчетном устройстве с нормированной погрешностью.

*Скорость измерения* – максимальное число измерений в единицу времени, выполняемых с нормированной погрешностью.

*Полное входное сопротивление  $Z_{вх}$*  – сопротивление измерительного прибора со стороны его входных зажимов, которое определяет реакцию входного сигнала на подключение прибора к источнику этого сигнала. За счет него возникает рассогласование по входу и, как следствие, методическая погрешность измерения. На сравнительно низких частотах входная цепь прибора, включаемого параллельно измеряемой цепи, может быть представлена ее эквивалентной схемой, состоящей из соединенных параллельно резистора сопротивлением  $R_{вх}$  и конденсатора емкостью  $C_{вх}$ .

Чтобы не оказывать влияния на измеряемую цепь, измерительные приборы должны иметь как можно большее активное входное сопротивление  $R_{вх}$  и возможно меньшую входную емкость  $C_{вх}$ . Поэтому в области низких частот, когда емкостное сопротивление очень велико по сравнению с активным сопротивлением  $1/(\omega C_{вх}) \gg R_{вх}$ , полное входное сопротивление измерительного прибора  $Z_{вх} = R_{вх}$ . В области высоких частот полное входное сопротивление прибора определяется преимущественно емкостью  $Z_{вх} \approx 1/(\omega C_{вх})$ , так как в этом случае  $1/(\omega C_{вх}) \ll R_{вх}$ .

*Полное выходное сопротивление  $Z_{вых}$*  – сопротивление измерительного прибора со стороны его выходных зажимов, которое определяет реакцию выходного сигнала прибора на подключение к его выходу фиксированной нагрузки. За счет него возникает рассогласование по выходу и, как следствие, погрешность измерения.

*Вариация показаний* – разность между показаниями, соответствующими одной и той же точке диапазона измерений при двух направлениях медленного изменения измеряемой величины, то есть при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины. Вариация характеризует, насколько устойчиво повторяются показания прибора при измерениях одних и тех же значений измеряемой величины.

*Время установления показаний* (время успокоения) – промежуток времени, прошедший с момента изменения измеряемой величины до момента установления показаний. Для аналоговых приборов момент установления показаний определяется моментом, когда амплитуда колебаний указателя становится не больше, чем погрешность прибора.

*Собственная потребляемая мощность*  $P_{\text{соб}}$  – мощность, потребляемая измерительным прибором от измеряемой цепи. Чем меньше  $P_{\text{соб}}$ , тем точнее измерения.

*Погрешность* – основная точностная характеристика ИП, определяющая инструментальную составляющую погрешности результатов измерений.

#### **В. Динамические характеристики.**

В зависимости от характера изменения измеряемой физической величины и свойств СИ (следовательно ИП) они могут работать в статическом или динамическом режимах.

Если СИ реагирует на изменения измеряемой физической величины во времени и преобразовательные процессы, происходящие в нем, зависят от его динамических свойств, то такой режим работы называется *динамическим*. При медленном изменении измеряемой физической величины во времени или его отсутствии режим работы СИ считается *статическим*.

Погрешности СИ, определяемые характером изменения физической величины, также разделяют на статические и динамические.

*Динамические характеристики* – это характеристики инерционных свойств СИ. Они определяют зависимость параметров выходного сигнала СИ от изменяющихся во времени величин (параметров входного сигнала, внешних влияющих величин, нагрузки). В зависимости от полноты описания динамических свойств ИП различают полные и частные динамические характеристики.

Основой их являются полная динамическая характеристика, полностью описывающая принятую математическую модель динамических свойств ИП. В качестве нее используют: переходную, импульсную переходную, амплитудно-фазовую и амплитудно-частотную характеристики; совокупность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик; передаточную функцию или каждую из них в отдельности. Для полной динамической характеристики нормируется номинальное значение и пределы допускаемых отклонений от них. Предпочтительной является та характеристика, которую проще получить экспериментально.

*Переходная характеристика*  $h(t)$  – это временная характеристика ИП, полученная в результате подачи на его вход сигнала в виде единичной функции заданной амплитуды  $X(t) = X_M \cdot 1(t)$ . Она описывает инерционность ИП, обуслов-

ливающую запаздывание и искажение выходного сигнала относительно входного. Переходную характеристику находят либо опытным путем, либо решая соответствующее дифференциальное уравнение при  $X(t) = X_M \cdot 1(t)$ .

*Импульсная переходная характеристика*  $g(t)$  – это временная характеристика ИП, полученная в результате приложения к его входу сигнала в виде дельта-функции.

Переходная и импульсная характеристики связаны между собой:

$$h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau \quad (2.16)$$

Как и дифференциальное уравнение, эти характеристики в полной мере определяют динамические свойства ИП. Выходной сигнал при известном входном  $X(t)$  определяют с помощью интеграла Дюамеля:

$$Y(t) = \int_0^t X(\tau) g(t - \tau) d\tau; \quad Y(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t X(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (2.17)$$

К *частотным характеристикам* относятся амплитудно-фазовая  $G(j\omega)$ , амплитудно-частотная  $A(\omega)$  и фазочастотная  $\varphi(\omega)$  характеристики. Частотные методы анализа основаны на исследовании прохождения гармонических колебаний различных частот через ИП. Если на вход линейного ИП подать входной сигнал  $X(j\omega) = X_M(\omega) \cdot e^{j\omega t}$ , то выходной сигнал можно записать в виде

$$Y(j\omega) = Y_M \cdot e^{j(\omega t + \varphi(\omega))} = Y_M(\omega) e^{j\omega t} \quad (2.18)$$

*Амплитудно-фазовой характеристикой* называют отношение

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{Y_M(j\omega)}{X_M(j\omega)} = \frac{Y_M(\omega)}{X_M(\omega)} e^{j\varphi(\omega)} \quad (2.19)$$

Оно описывает изменение показаний ИП при изменении частоты входного сигнала и характеризует только установившийся режим работы.

В практике измерений получила большое распространение *амплитудно-частотная характеристика* (АЧХ)

$$A(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{Y_M(\omega)}{X_M(\omega)}, \quad (2.20)$$

представляющая собой зависящее от круговой частоты отношение амплитуды выходного сигнала линейного ИП в установившемся режиме к амплитуде входного синусоидального сигнала.

*Фазочастотная характеристика* (ФЧХ)  $\varphi(\omega)$  – это зависящая от частоты разность фаз между выходным сигналом и входным синусоидальным сигналом линейного ИП в установившемся режиме.

Ясная физическая интерпретация и относительная простота экспериментального определения послужили причиной широкого применения частотных характеристик в метрологии.

Частотные характеристики ИП связаны с другими его динамическими характеристиками следующими соотношениями:

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} g(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau; \quad g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (2.21)$$

Частными динамическими характеристиками могут быть отдельные параметры полных динамических характеристик или характеристики, не отражающие полностью динамических свойств ИП, но необходимые для определения возможности выполнения измерений с требуемой точностью.

Для аналоговых ИП частными динамическими характеристиками являются: время реакции, постоянная времени, коэффициент демпфирования.

Для цифровых ИП к частным динамическим характеристикам относятся: время реакции, погрешность датирования отсчета, максимальная частота (скорость) измерений.

Нормирование частных динамических характеристик проводится через номинальные значения и пределы допускаемых отклонений от них.

## 2.5 Общие структурные схемы измерительных приборов

Основные методы измерений (рассмотренные нами ранее) – метод прямого преобразования и метод сравнения – реализуются на практике с помощью измерительных приборов прямого преобразования и сравнения.

*Измерительным прибором прямого преобразования* называется прибор, выходной сигнал которого образуется в результате последовательных преобразований входного сигнала в его измерительной цепи. При этом под измерительной цепью понимается совокупность элементов ИП, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. Таким образом, согласно определению типовую структурную схему измерительного прибора прямого преобразования можно представить в следующем виде (рисунок 2.1).

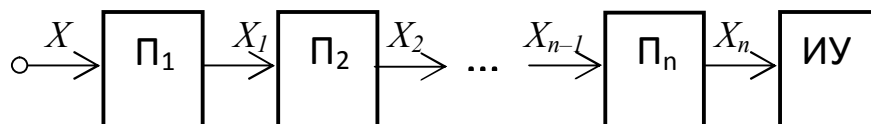


Рисунок 2.1 – Типовая структурная схема ИП прямого преобразования

Как видно из рисунка 2.1, схема состоит из последовательного каскадного соединения измерительных преобразователей ( $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ ) и измерительного устройства (ИУ). Тип ИУ определяется принадлежностью прибора к той или иной классификационной группе (аналоговый или цифровой, показывающий или регистрирующий и т. п.). Входной сигнал  $X$ , несущий информацию об измеряемой величине, последовательно преобразуется в промежуточные сигналы  $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}$  и в выходной сигнал  $X_n$ .

В общем случае каждый из них является переменным во времени и может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих. В связи с этим коэффициент преобразования  $K_i$  должен выражаться комплексным числом, а анализ структурной схемы проводится с использованием теории функций комплексного переменного. Однако для простоты рассмотрения будем счи-

тать, что информативным параметром сигнала является только его амплитуда (это чаще всего и бывает на практике). Тогда коэффициенты преобразования выразятся вещественными числами. Предположим также, что коэффициенты преобразования не зависят от уровня сигнала, т. е. преобразователи будем считать линейными:  $K_i = const$ .

Тогда для выходного сигнала  $X_n$  прибора прямого преобразования можно записать

$$X_n = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n \cdot X, \quad (2.22)$$

где  $K_1 = X_1/X$ ,  $K_2 = X_2/X_1$ , ...,  $K_n = X_n/X_{n-1}$  – коэффициенты преобразования преобразователей  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$  или

$$X_n = S \cdot X, \quad (2.23)$$

где  $S = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$  – по определению, не что иное, как чувствительность ИП.

Из выражений (2.22) и (2.23) видно, что изменение коэффициента преобразования любого преобразователя приводит к изменению выходного сигнала  $X_n$ . Таким образом, в приборах прямого преобразования происходит суммирование погрешностей, вносимых отдельными преобразователями. Это и затрудняет изготовление подобных приборов с высокой точностью. Для достижения высокой точности прибора требуется высокая стабильность параметров и характеристик каждого из преобразователей. Кроме того, характерной особенностью этих приборов, как видно из рисунка 2.1, является отсутствие обратных связей.

*Измерительным прибором сравнения* называется прибор, выходной сигнал которого образуется в результате сравнения в его измерительной цепи сигналов, содержащих информацию об измеряемой и известной физических величинах. При этом известная величина воспроизводится с помощью меры или набора мер. Кроме меры, обязательным узлом такого прибора является схема сравнения, где и осуществляется сравнение входного сигнала с сигналом, поступающим от меры ( $X_M$ ). Таким образом, типовая структурная схема прибора сравнения имеет следующий вид (рисунок 2.2).

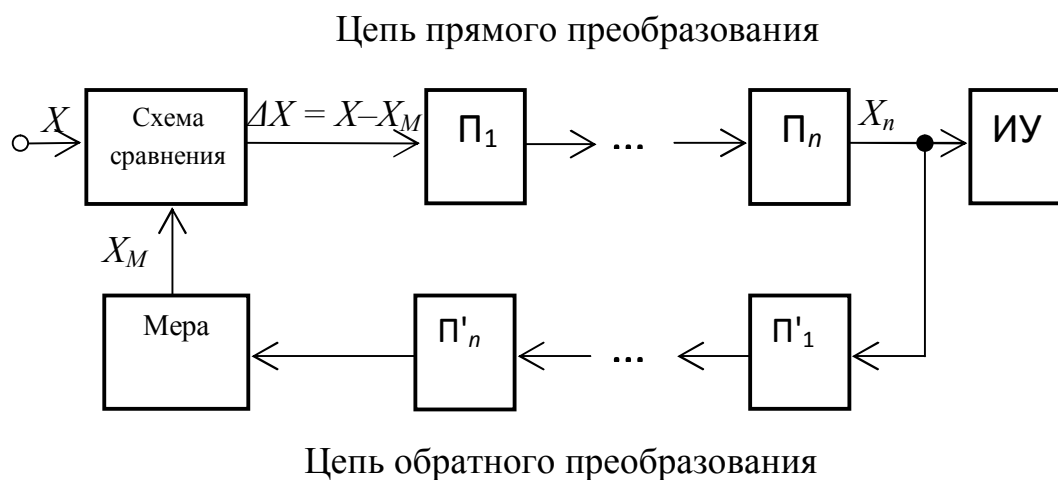


Рисунок 2.2 – Типовая структурная схема ИП сравнения

Как видно из рисунка, в результате сравнения  $X$  и  $X_M$  на выходе схемы сравнения образуется разностный сигнал  $\Delta X$ , который по цепи прямого преоб-

разования поступает на ИУ. Характерной особенностью приборов сравнения является наличие обратной связи, которая осуществляется с помощью цепи обратного преобразования. Благодаря этому обеспечивается изменение  $X_M$  и реализуется конкретная модификация метода сравнения (мы их перечисляли). Например, при нулевом методе изменением  $X_M$  добиваются нулевых показаний ИУ (т. е. компенсируют  $X$  и  $X_M$ ), при дифференциальном методе на ИУ воздействует выходной сигнал, определяемый величиной  $\Delta X$  и т. д. Таким образом, в приборах сравнения всегда образуется разностный сигнал

$$\Delta X = X - X_M. \quad (2.24)$$

Сигнал от меры  $X_M$ , как видно из рисунка, равен

$$X_M = \beta \cdot X_n, \quad (2.25)$$

где  $\beta$  – результирующий коэффициент преобразования цепи обратного преобразования.

Примем те же допущения, что и при рассмотрении приборов прямого преобразования, т. е. что все преобразователи линейны и измерения статистические.

Тогда, если  $\Delta X = 0$  (нулевой метод), то  $X_M = X$  и

$$X_n = \frac{1}{\beta} \cdot X. \quad (2.26)$$

Из выражения (2.26) следует, что теперь  $X_n$  не зависит от коэффициентов преобразования цепи прямого преобразования, а чувствительность прибора сравнения равна

$$S = \frac{1}{\beta}. \quad (2.27)$$

Если  $\Delta X \neq 0$  (дифференциальный метод), то  $X_n = K \cdot \Delta X$ , где  $K$  – результирующий коэффициент преобразования цепи прямого преобразования. Далее, выразив  $\Delta X$  через  $X$  получим

$$X_n = \frac{K}{1 + K \cdot \beta} \cdot X \quad (2.28)$$

и

$$S = \frac{K}{1 + K \cdot \beta}. \quad (2.29)$$

Проанализируем эти выражения. Если  $K \cdot \beta \gg 1$ , то нестабильность  $K$  практически не влияет на работу прибора. Для получения высокой чувствительности следует уменьшать  $\beta$ , а для выполнения условия  $K \cdot \beta \gg 1$  необходимо увеличивать  $K$ . Таким образом, всегда имеется принципиальная возможность изготавливать приборы сравнения высокой точности.

В заключение отметим, что реальные измерительные приборы могут иметь также комбинированную структурную схему и объединять в себе элементы как приборов прямого преобразования, так и приборов сравнения.

## 3 Погрешности измерений и математическая обработка результатов измерений

### 3.1 Погрешности измерений. Причины их возникновения и формы представления

Значение физической величины  $X$ , полученное в результате измерения, всегда отличается от истинного значения этой измеряемой величины  $Q$ .

*Истинные значения физических величин* – это значения, идеальным образом отражающие свойства данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении. Они не зависят от средств измерений и являются той абсолютной истиной, к которой стремятся при измерениях.

Напротив, результаты измерений являются продуктами познания. Представляя собой приближенные оценки значений величин, найденные в результате измерения, они зависят от метода измерений, средств измерений и других факторов.

Таким образом, любое измерение всегда выполняется с некоторой погрешностью и можно записать, что

$$X = Q \pm \Delta X. \quad (3.1)$$

Как следует из выражения (3.1), *погрешностью результата измерения* (погрешностью измерения) называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Тщательное выполнение измерений, использование более точных СИ, применение различных методов и приемов измерений может в лучшем случае только уменьшить погрешность измерения, но полностью исключить погрешность из результатов измерений невозможно. Поэтому в задачу каждого измерения обязательно входит оценка погрешности полученного результата измерения.

Количественно погрешность измерения может быть выражена в формах абсолютной ( $\Delta$ ) и относительной ( $\delta$ ) погрешности.

Абсолютная погрешность определяется как разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины и всегда выражается в единицах измеряемой величины:

$$\Delta = X - Q. \quad (3.2)$$

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta}{Q}. \quad (3.3)$$

Чаще на практике относительную погрешность выражают в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} \cdot 100 \%. \quad (3.4)$$

Наряду с понятием «погрешность» на практике широко применяют понятие «точность». *Точность измерений* – это характеристика качества измерений, отражающая близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Как правило термин «точность» употребляют в сочетании со словами, характеризующими точность измерений качественно: «высокая точность измерений», «низкая точность измерений» и т. п.

Количественно точность измерений оценивают величиной, обратной модулю относительной погрешности

$$\varepsilon = \frac{1}{|\delta|} . \quad (3.5)$$

Из (3.5) видно, что чем меньше погрешность, тем выше точность и наоборот.

Но поскольку истинное значение  $Q$  измеряемой величины неизвестно, то для определения погрешности измерения в формулы (3.2)–(3.4) вместо истинного значения подставляют так называемое действительное  $X_d$ .

Под *действительным значением измеряемой величины* понимается ее значение, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели оно может быть использовано вместо него. Более того, при малых значениях относительной погрешности ( $\delta \ll 1$ , что обычно выполняется при рабочих измерениях на практике) в качестве  $X_d$  используют результат измерения  $X$ . При поверках СИ за действительное принимают значение, полученное с помощью более точного образцового СИ или эталона.

Причины возникновения погрешностей очень разнообразны. Основными причинами возникновения погрешностей являются: несовершенство методов измерений, средств измерений и органов чувств наблюдателя. В отдельную группу следует объединить причины, связанные с влиянием условий проведения измерений. Последние проявляются двояко. С одной стороны, с изменением внешних условий изменяются истинные значения измеряемых величин. С другой – условия проведения измерений влияют и на характеристики средств измерений и физиологические свойства органов чувств наблюдателя, а через их посредство становятся источником погрешностей измерений.

Таким образом, погрешность результата измерения может быть представлена как результат совместного воздействия различного рода факторов объективного и субъективного характера, что необходимо учитывать при проведении классификации погрешностей.

В зависимости от характера проявления можно выделить две основные группы факторов, под влиянием которых складывается суммарная погрешность результата измерения.

К первой группе можно отнести факторы, проявляющиеся нерегулярно или проявляющиеся с интенсивностью, которую трудно предвидеть. К ним относятся, например, малые флуктуации влияющих величин (температуры, давления окружающей среды и т. п.), случайные изменения самой измеряемой величины, случайные погрешности СИ и др. Доля, или составляющая суммарной



погрешности измерения, возникающая под действием факторов этой группы, определяет случайную погрешность измерения.

Таким образом, *случайная погрешность измерения* – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины, проведенных в одних и тех же условиях.

При создании средств измерений и организации процесса измерения в целом интенсивность проявления факторов, определяющих случайную погрешность измерения, удастся свести к общему уровню, так что все они влияют более или менее одинаково на формирование случайной погрешности. Однако некоторые из них, например, внезапное падение напряжения в сети электропитания, могут проявиться неожиданно сильно, в результате чего погрешность примет размеры, явно выходящие за границы, обусловленные ходом измерительного эксперимента. Такие погрешности в составе случайной погрешности называются *грубыми*. К ним тесно примыкают *промахи* – грубые погрешности, возникающие от неправильных действий наблюдателя и обусловленные, например, неправильным обращением со средствами измерений, неверным отсчетом показаний, ошибками при записи результатов измерений и др.

Ко второй группе можно отнести факторы, постоянные или закономерно изменяющиеся в процессе измерительного эксперимента, например, плавные изменения влияющих величин. Составляющая суммарной погрешности измерения, возникающая под действием факторов этой группы, определяет систематическую погрешность измерения.

Таким образом, *систематическая погрешность измерения* – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях.

В процессе измерения описанные составляющие погрешности проявляются одновременно и суммарную погрешность можно представить в общем случае в виде их суммы

$$\Delta = \overset{\circ}{\Delta} + \Delta_c, \quad (3.6)$$

где  $\overset{\circ}{\Delta}$  – случайная, а  $\Delta_c$  – систематическая погрешности.

В зависимости от характера влияния на результат измерения погрешности делят на аддитивные и мультипликативные.

*Аддитивной* называют погрешность, значение которой не зависит от значения измеряемой величины.

*Мультипликативной* называют погрешность, значение которой изменяется с изменением измеряемой величины. Оба эти вида погрешностей могут иметь как случайный, так и систематический характер. Кроме того, на практике погрешности измерения часто имеют как аддитивную, так и мультипликативную составляющие.

В зависимости от источника возникновения различают четыре основные составляющие погрешности измерения: методическая, инструментальная, внешняя и субъективная.

*Методическая погрешность* (погрешность метода измерения) – составляющая погрешности результата измерения, которая возникает из-за несовершенства метода измерений.

Во многих методах измерений можно обнаружить методическую погрешность, являющуюся следствием тех или иных допущений и упрощений, применения эмпирических формул и функциональных зависимостей и др. В некоторых случаях влияние таких допущений оказывается незначительным, т. е. намного меньше, чем допускаемые погрешности измерений; в других случаях – превышает эти погрешности.

В общем случае задача оценки методической погрешности относится к разряду сложных. Однако во многих случаях методические погрешности могут быть вычислены до проведения измерений (априорно) и исключены из результатов измерений. Например, методическую погрешность, возникающую при измерении амплитуды сигнала вольтметром, который имеет шкалу, проградуированную в среднеквадратических значениях, можно исключить путем пересчета результата измерения через коэффициент амплитуды исследуемого сигнала.

Примером методических погрешностей являются также погрешности метода измерений электрического сопротивления при помощи амперметра и вольтметра (рисунок 3.1). Если сопротивление  $R_x$  определяется по формуле закона Ома  $R_x = U_V/I_a$ , где  $U_V$  – падения напряжения, измеренное вольтметром  $V$ ;  $I_a$  – сила тока, измеренная амперметром  $A$ , то в обоих случаях будут допущены методические погрешности измерений.

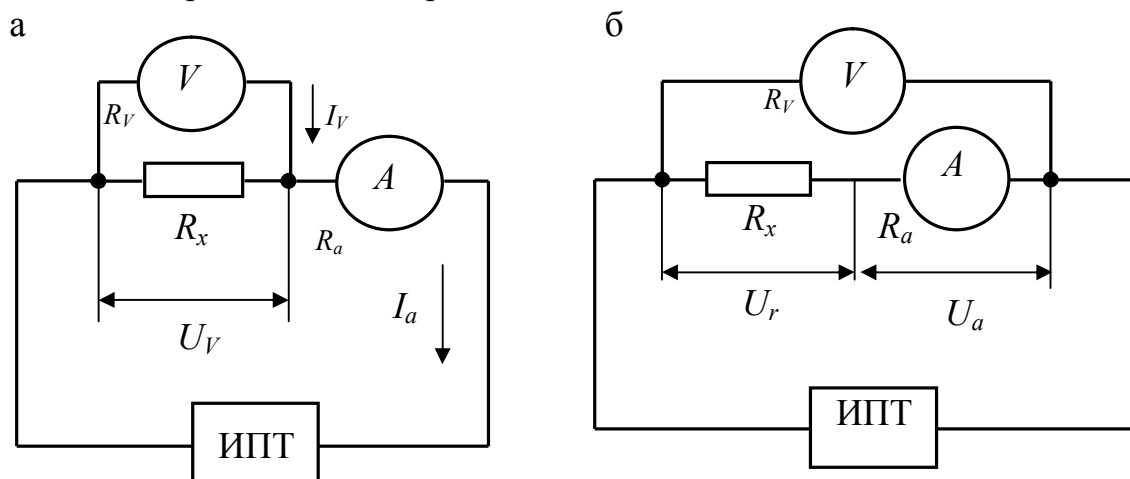


Рисунок 3.1 – Электрические схемы измерения сопротивления методом амперметра и вольтметра

На рисунке 3.1, а сила тока  $I_a$ , измеренная амперметром, будет больше силы тока в сопротивлении  $R_x$  на значение силы тока  $I_V$  в вольтметре, включаемом параллельно сопротивлению. Сопротивление  $R_x$ , вычисленное с помощью приведенной формулы, окажется меньше действительного. На рисунке 3.1, б

напряжение, измеренное вольтметром  $V$ , окажется больше падения напряжения  $U_r$  на сопротивлении  $R_x$  на значение  $U_a$  (падение напряжения на сопротивлении  $R_a$  амперметра  $A$ ).

Сопротивление, вычисленное по формуле закона Ома, окажется больше сопротивления  $R_x$  на значение  $R_a$  (сопротивление амперметра). Поправки в обоих случаях можно легко вычислить, если знать сопротивление вольтметра и амперметра. Поправки можно не вносить в том случае, если они значительно меньше допускаемой погрешности измерения сопротивления  $R_x$ , например, в первом случае, если сопротивление вольтметра значительно больше  $R_x$ , а во втором случае, если  $R_a$ , значительно меньше  $R_x$ .

Как правило, методическая погрешность является систематической погрешностью.

*Инструментальная погрешность* – это составляющая погрешности измерения, возникающая из-за несовершенства используемых средств измерений. Инструментальная погрешность – лишь один из источников погрешности измерения и, в свою очередь, определяет только одну из ее составляющих – инструментальную погрешность. В свою очередь является суммарной погрешностью, составляющие которой – погрешности функциональных узлов СИ – могут быть как систематическими, так и случайными.

С технической точки зрения различают три составляющих инструментальной погрешности: схемную, технологическую и эксплуатационную.

*Схемная погрешность* (погрешность схемы или конструкции) – это составляющая инструментальной погрешности, присущая самой структурной или кинематической схеме (конструкции) СИ. Эта погрешность не связана с недостатками изготовления СИ.

*Технологическая погрешность* – это составляющая инструментальной погрешности, возникающая в результате несовершенства технологии изготовления СИ. Например, к технологическим относятся погрешности неточного нанесения отметок шкалы.

*Эксплуатационная погрешность* – это составляющая инструментальной погрешности, возникающая в процессе эксплуатации СИ. Например, износ деталей, старение, неисправности отдельных узлов и т. д.

*Внешняя погрешность* – составляющая погрешности измерения, вызываемая отклонением одной или нескольких влияющих величин от нормальных значений или выходом их за пределы нормальной области (например, влияние температуры, внешних электрических и магнитных полей, механических воздействий и т. п.). Как правило, внешние погрешности определяются дополнительными погрешностями применяемых средств измерений и являются систематическими. Однако при нестабильности влияющих величин они могут стать случайными.

*Субъективная (личная) погрешность* – составляющая погрешности измерения, которая обусловлена индивидуальными особенностями экспериментатора и может быть как систематической, так и случайной. Ее причинами являются физиологические особенности организма, скорость реакции, укоренившиеся

неправильные навыки и т. п. субъективной погрешности следует отнести прежде всего погрешность из-за недостаточно точного отсчитывания показаний СИ.

При применении современных цифровых средств измерений этой субъективной погрешностью можно пренебречь. Однако при отсчете показаний стрелочных приборов такие погрешности могут быть и значительными из-за неправильного отсчета долей деления шкалы, асимметрии, возникающей при установке штриха посередине между двумя рисками, и т. п.

## 3.2 Систематические погрешности измерений

### 3.2.1 Классификация систематических погрешностей

Напомним, что систематической погрешностью называется составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях. Следовательно, исходя из определения, по характеру проявления систематические погрешности подразделяются на постоянные и переменные.

*Постоянные* систематические погрешности возникают, например, при неправильной установке начала отсчета, неправильной градуировке средств измерений и остаются постоянными по своему значению и знаку в течение всего времени измерений.

*Переменные* систематические погрешности в свою очередь делятся на прогрессирующие, периодические и изменяющиеся по сложному закону.

*Прогрессирующими* называются погрешности, которые в процессе измерений постепенно убывают или возрастают. Например, причинами возникновения прогрессирующих погрешностей могут быть разрядка источников питания, старение резисторов, конденсаторов, деформация механических деталей и т. п.

*Периодическими* называют погрешности, периодически изменяющие значение и знак. В качестве примера можно привести средства измерений с круговой шкалой, стрелка которых при измерении совершает несколько оборотов (секундомеры, индикаторы часового типа и т. п.). Периодическая погрешность в показаниях таких устройств возникает в тех случаях, когда ось вращения стрелки не совпадает с центром окружности шкалы. Другой пример – наложение гармонической помехи, источником которой является напряжение сети, на измеряемое с помощью вольтметра напряжение постоянного тока.

Погрешности, *изменяющиеся по сложному закону*, могут быть выражены в виде кривой или в виде формулы. В качестве примера можно привести погрешность меры длины, возникающую при отклонении температуры от нормальной, т. е. той, при которой была определена длина меры. Эти погрешности выражаются следующей формулой:  $\Delta l_t = (a \cdot \Delta t + b \cdot \Delta t^2)$ , где  $\Delta l_t$  – погрешность меры длины, возникающая при изменении температуры на  $\Delta t$ ;  $l_n$  – длина меры при нормальной температуре;  $\Delta t = t_{\text{и}} - t_{\text{н}}$  – отклонение температуры от нормальной;  $t_{\text{н}}$  – нормальная температура;  $t_{\text{и}}$  – температура при применении меры длины;  $a, b$  – коэффициенты, определенные при проведении совместных измерений.

Наличие систематических погрешностей устойчиво искажает результаты измерений. Отсутствие или близость их к нулю определяет *правильность* измерений. Таким образом, *правильность измерений* – это характеристика измерений, отражающая близость к нулю систематических погрешностей измерений. Чтобы обеспечить правильность измерений, необходимо предусматривать обнаружение, оценку и уменьшение (либо полное исключение) систематических погрешностей. Те систематические погрешности, которые остались в результатах измерений после этих операций, называются *неисключенными* систематическими погрешностями.

### 3.2.2 Способы обнаружения и оценки систематических погрешностей

Задача обнаружения и оценки систематических погрешностей относится к числу достаточно сложных метрологических задач и не всегда разрешима. Применяемые способы обнаружения и оценки систематических погрешностей можно условно разбить на две группы: теоретические и экспериментальные.

*Теоретические способы* возможны и эффективны тогда, когда известно или может быть получено аналитическое выражение для искомой погрешности на основании определенной информации. Характерным примером является обнаружение и оценка методических погрешностей, которые возникают при введении различных упрощений и допущений (например, методическая погрешность измерения электрического сопротивления при помощи амперметра и вольтметра, рассмотренная выше).

*Экспериментальные способы* также предполагают наличие определенной априорной информации об исследуемых погрешностях, но эта информация носит лишь качественный характер. Обнаружение и оценка систематических погрешностей в таких случаях возможны после проведения специальных экспериментальных исследований и обработки их результатов.

Результаты наблюдений, полученные при наличии систематических погрешностей, называют неисправленными. В отличие от исправленных (не содержащих систематических погрешностей) они снабжены штрихами при обозначении:  $X'_1, \dots, X'_n$ . Вычисленные в этих условиях средние арифметические значения и отклонения от них результатов наблюдений будем также называть неисправленными и ставить штрихи у символов этих величин. Таким образом,

$$\bar{X}' = \frac{\sum_{i=1}^n X'_i}{n} ; \quad V'_i = X'_i - \bar{X}' . \quad (3.7)$$

Поскольку неисправленные результаты наблюдений включают в себя систематические погрешности, сумму которых для каждого  $i$ -го наблюдения будем обозначать через  $\Delta_{ci}$ , то их математическое ожидание не совпадает с истинным значением измеряемой величины и отличается от него на некоторую величину  $\Delta_c$ , называемую систематической погрешностью среднего арифметического. Действительно,

$$\Delta_c = M[X'] - Q = \frac{\sum_{i=1}^n M[X_i - \Delta_{ci}] - \sum_{i=1}^n M[X_i]}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{ci}}{n}. \quad (3.8)$$

Случайные отклонения результатов наблюдений от средних арифметических отличаются от неисправленных отклонений:

$$\begin{aligned} V_i' - V_i &= (X_i' - \bar{X}') - (X_i - \bar{X}) = (X_i' - X_i) - (\bar{X}' - \bar{X}) = \\ &= \Delta_{ci} - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{ci}}{n} = \Delta_{ci} - \Delta_c. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Если систематические погрешности постоянны, т. е.  $\Delta_{ci} = \Delta_c$ ,  $i = 1, \dots, n$ , то  $V_i' = V_i$  и неисправленные отклонения могут быть непосредственно использованы для оценки рассеивания ряда наблюдений. В противном случае необходимо предварительно исправить отдельные результаты наблюдений, введя в них так называемые поправки, равные систематическим погрешностям по величине и обратные по знаку:

$$q_i = -\Delta_{ci}. \quad (3.10)$$

Таким образом, для нахождения исправленного среднего арифметического и оценки его рассеивания относительно истинного значения измеряемой величины необходимо обнаружить систематические погрешности и исключить их путем введения поправок или соответствующей каждому конкретному случаю организации самого измерения. Остановимся подробнее на некоторых способах обнаружения систематических погрешностей.

Постоянные систематические погрешности, определяемые при эксперименте, не влияют на значение случайных отклонений результатов наблюдений от средних арифметических, поэтому никакая математическая обработка результатов наблюдений не может привести к их обнаружению. Анализ таких погрешностей возможен только на основании некоторых априорных знаний об этих погрешностях, получаемых, например, при поверке средств измерений. Измеряемая величина при поверке обычно воспроизводится образцовой мерой, действительное значение которой известно. Поэтому разность между средним арифметическим результатов наблюдения и значением меры равна искомой систематической погрешности.

Для обнаружения постоянных систематических погрешностей, зависящих от внешних влияющих величин, необходимо изменять значения этих влияющих величин. Если средние арифметические результатов наблюдений резко изменяются при изменении влияющих величин, то данные результаты содержат постоянную систематическую погрешность, зависящую от влияющих величин.

При прогрессирующей систематической погрешности последовательность неисправленных отклонений результатов наблюдений обнаруживает тенденцию к возрастанию или убыванию. Если же в ряде результатов наблюдений присутствует периодическая систематическая погрешность, то группы знаков

«плюс» или «минус» в последовательности неисправленных отклонений результатов наблюдений могут периодически сменять друг друга, если, конечно, случайные погрешности меньше систематических.

Одним из наиболее действенных способов обнаружения систематических погрешностей в ряде результатов наблюдений является построение графика неисправленных значений случайных отклонений результатов наблюдений от средних арифметических. Разумеется, сделанные по результатам анализа таких графиков выводы носят лишь качественный характер и объективны лишь в тех случаях, когда сопутствующие случайные погрешности значительно меньше искомой систематической.

### 3.2.3 Методы уменьшения систематических погрешностей

Так как систематические погрешности являются детерминированными величинами, уменьшение или даже полное исключение их возможно на всех этапах измерительного эксперимента. Методы исключения систематических погрешностей можно разделить на три основные группы:

- устранение источников систематических погрешностей до начала измерений (профилактика систематических погрешностей);
- исключение систематических погрешностей в процессе измерения с использованием специальных методов (экспериментальное исключение систематических погрешностей);
- внесение известных поправок в результат измерения (исключение систематических погрешностей математическим путем).

Рассмотрим эти методы.

*Устранение источников систематических погрешностей до начала измерений.* Этот метод исключения систематических погрешностей является наиболее рациональным, так как он полностью или частично освобождает от необходимости устранять погрешности в процессе измерения или вычислять результат с учетом поправок. Другими словами, устранение источников систематических погрешностей существенно упрощает и ускоряет процесс измерения.

Метод может включать в себя: выбор таких методов, средств измерений, планов проведения экспериментов, которые обеспечивали бы минимальные систематические погрешности; тщательную установку нулевых показаний и калибровку средств измерений; прогрев средств измерений в течение времени, указанного в инструкции по эксплуатации; применение при сборке коротких соединительных проводов, а на сверхвысоких частотах – коаксиальных кабелей; применение в необходимых случаях экранирования и термостатирования; правильное размещение средства измерений (установка в рабочее положение, размещение вдали от источников тепла и электромагнитных полей и т. п.); применение только предварительно поверенных средств измерений и т. д.

*Исключение систематических погрешностей в процессе измерений.* Этот метод является эффективным путем исключения ряда систематических погрешностей. При этом нет необходимости применять какие-либо специаль-

ные установки и приспособления. Как правило, это методы измерений, позволяющие не только исключать систематические погрешности, но и оценивать их.

*Метод замещения.* Этот метод измерений является одной из модификаций метода сравнения и обеспечивает наиболее полную компенсацию постоянной систематической погрешности. Суть данного метода состоит в том, что вначале измеряют неизвестную величину  $X$  и фиксируют показание измерительного прибора. Затем эту величину  $X$  заменяют известной величиной, воспроизводимой мерой  $X_M$ . Регулируя величину меры, добиваются того же показания ИП, что и при измерении  $X$ , и отсчитывают значение  $X_M$  по показателю меры. Тогда  $X = X_M$ , т. е. за окончательный результат измерения принимают значение меры с погрешностью, возникающей при отсчете. Так как точность мер обычно выше точности ИП, данный метод во многих случаях позволяет существенно повысить точность измерения, даже используя недостаточно точные ИП. Пусть, например, измерялось сопротивление резистора  $R_x$  омметром малой точности. Результат измерения равен  $X = R_x + \Delta_c$ , где  $R_x$  и  $\Delta_c$  – соответственно показание омметра и систематическая погрешность измерения. Заменив  $R_x$  магазином сопротивлений и отрегулировав его так, чтобы получились те же показания омметра, получим, что  $X = X_M + \Delta_c$ . Приравняв эти два значения  $X$ , получим  $R_x + \Delta_c = R_M + \Delta_c$ , откуда  $R_x = R_M + \Delta_c - \Delta_c = R_M$ .

*Метод компенсации погрешности по знаку.* Этот метод исключения систематических погрешностей заключается в том, что измерения проводят дважды так, чтобы известная по природе, но неизвестная по размеру погрешность входила в результаты с противоположными знаками. Погрешность исключается при вычислении среднего значения. В алгебраической форме это можно выразить следующим образом.

Пусть  $X_1$  и  $X_2$  – результаты двух измерений;  $\Delta_c$  – систематическая погрешность, природа которой известна, но неизвестно ее значение;  $X_d$  – значение измеряемой величины, свободное от данной погрешности. Тогда  $X_1 = X_d + \Delta_c$ ;  $X_2 = X_d - \Delta_c$ . Среднее значение равно

$$X = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{(X_d + \Delta_c) - (X_d - \Delta_c)}{2} = X_d. \quad (3.11)$$

Этот метод применяется ограниченно. Его используют для исключения только таких погрешностей, источники которых имеют направленное действие.

Одним из характерных примеров является исключение погрешности, обусловленное влиянием магнитного поля Земли. Для этого используют средство измерений, о котором известно, что под действием магнитного поля Земли в его показаниях могут возникнуть систематические погрешности.

Первое измерение можно проводить, когда средство измерений находится в любом положении. Перед тем как выполнить второе измерение, средство измерений поворачивают в горизонтальной плоскости на 180 градусов. Если в первом случае магнитное поле Земли, складываясь с полем средства измерений, вызывает положительную погрешность, то при повороте его на



180 градусов магнитное поле Земли будет оказывать противоположное действие и вызовет отрицательную погрешность по размеру, равную первой.

Пользуясь методом компенсации погрешности по знаку, можно исключить систематические погрешности, вызванные явлениями гистерезисного характера (магнитный гистерезис в ферромагнитных материалах, механический гистерезис в упругих материалах и т. п.).

*Метод изменения знака входной величины.* Этот метод основан на том, что величина и знак систематической погрешности не изменяются при смене знака измеряемой величины на противоположный. Так же, как и в предыдущем методе, измерения проводятся дважды, и погрешность исключается при вычислении среднего значения разности двух показаний. В алгебраической форме это можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_d + \Delta_c; X_2 = -X_d + \Delta_c; \\ X &= \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{(X_d + \Delta_c) - (-X_d + \Delta_c)}{2} = X_d. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Метод, например, может применяться в компенсаторах постоянного тока для исключения погрешности от термо- и контактных ЭДС. Здесь используется то обстоятельство, что знак термо- и контактных ЭДС не зависят от знака измеряемого и питающего напряжений.

*Метод периодических наблюдений.* В случае периодических погрешностей действенным методом исключения последних является метод периодических наблюдений, основанный на наблюдениях четного числа раз через полупериоды. Периодическая погрешность изменяется по закону

$$\Delta_c(t) = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right), \quad (3.13)$$

где  $t$  – независимая переменная, от которой зависит погрешность (время, угол поворота стрелки прибора и т. п.);  $T$  – период изменения погрешности.

Пусть при  $t = t_0$  значение погрешности

$$\Delta_c(t) = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t_0}{T}\right).$$

Найдем значение этой погрешности для  $t = t_0 + \Delta t$ , где интервал  $\Delta t$  таковой, что  $\Delta_c(t_0 + \Delta t) = -\Delta_c(t_0)$ . Определим значение интервала  $\Delta t$ . Имеем

$$2 \cdot \pi \cdot \frac{t_0 + \Delta t}{T} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{t_0}{T} + \pi,$$

откуда

$$2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t}{T} = \pi \text{ и } \Delta t = T/2. \quad (3.14)$$

В этом случае

$$[\Delta_c(t_0) + \Delta_c(t_0 + \Delta t)] = 0. \quad (3.15)$$

Следовательно, периодическая погрешность исключается, если взять среднее из двух наблюдений, произведенных одно за другим через интервал, равный полупериоду независимой переменной  $t$ , определяющей значение пе-

риодической погрешности. То же будет и для множества пар подобного рода наблюдений.

Например, применение этого метода в цифровых вольтметрах постоянного тока с двухтактным интегрированием позволяет обеспечить высокую помехозащищенность таких вольтметров. Это достигается благодаря тому, что время интегрирования измеряемого напряжения равно четному числу полупериодов помех от напряжения сети.

*Метод симметричных наблюдений.* Используется для исключения прогрессирующей погрешности, которая изменяется по линейному закону, например, пропорционально времени.

Такой характер имеет погрешность измерения напряжения с помощью потенциометра, если происходит заметное падение напряжения источника, создающего рабочий ток. Формально, если известно, что рабочий ток потенциометра изменяется линейно во времени, то для устранения возникающей погрешности достаточно двух наблюдений, выполненных с фиксацией времени после регулировки рабочего тока по нормальному элементу. Пусть

$$E_1 = U_x + k \cdot t_1; E_2 = U_x + k \cdot t_2, \quad (3.16)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – интервалы времени между регулировкой рабочего тока и наблюдениями;  $k$  – коэффициент пропорциональности между погрешностью измерения и временем;  $E_1$  и  $E_2$  – результаты наблюдений.

Отсюда

$$U_x = \frac{E_1 \cdot t_2 - E_2 \cdot t_1}{t_2 - t_1}. \quad (3.17)$$

Однако при точных измерениях целесообразно пользоваться более сложным алгоритмом, который состоит в том, что несколько наблюдений выполняют через равные промежутки времени и затем вычисляют средние арифметические симметрично расположенных наблюдений.

*Метод рандомизации.* Эффективным способом уменьшения систематических погрешностей является их рандомизация, т. е. перевод в случайные. Пусть, например, имеется  $n$  однотипных приборов с систематической погрешностью одинакового происхождения. Если для данного прибора эта погрешность постоянна, то от прибора к прибору она изменяется случайным образом. Поэтому измерение одной и той же величины всеми приборами и усреднение результатов полученных наблюдений позволяют значительно уменьшить эту погрешность. Того же эффекта можно добиться, изменяя методику и условия эксперимента или те параметры, от которых не зависит значение измеряемой величины, но зависят систематические погрешности ее измерения.

*Внесение известных поправок в результат измерения.* Систематические погрешности являются детерминированными величинами, поэтому в принципе могут быть вычислены и исключены из результатов измерения. Для исправления результатов наблюдений их складывают с поправками, равными систематическим погрешностям по величине и обратными им по знаку:

$$X_i = X_i' + q_i, \quad (3.18)$$

где  $X_i, X_i'$  – соответственно исправленный и неисправленный результаты наблюдений. Иногда результаты наблюдений умножают на поправочные множители ( $\eta$ ):

$$X_i = X_i' \cdot \eta. \quad (3.19)$$

Поправки исключают аддитивную погрешность, а поправочные множители – мультипликативную.

Поправка или поправочный множитель могут быть определены экспериментально, например, при поверке СИ или в результате специальных исследований. Они задаются в виде таблиц, графиков, номограмм или формул, отражающих связь погрешности с измеряемой или влияющей величиной.

### 3.2.4 Суммирование неисключенных систематических погрешностей

Систематические погрешности, которые остаются в результатах измерений после проведения операций обнаружения, оценки и исключения, называются неисключенными систематическими погрешностями (НСП). В принципе любой результат измерения содержит НСП, которые образуются из многих составляющих (метода, СИ, других источников). При обработке результатов измерений для определения погрешности измерений они суммируются со случайными. Однако прежде отдельные НСП должны быть просуммированы между собой для оценки доверительных границ суммарной НСП результата измерения  $\Delta_c$ .

При определении границы результирующей НСП ее отдельные составляющие рассматривают как случайные величины. Если известно, что распределение составляющих соответствует нормальному закону, то  $\Delta_c$  вычисляется при прямых измерениях по формуле

$$\Delta_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{ci}^2}, \quad (3.20)$$

где  $\Delta_{ci}$  граница  $i$ -й НСП;  $m$  – количество суммируемых НСП.

При отсутствии данных о виде распределения составляющих НСП их распределения принимают за равномерные и  $\Delta_c$  определяют из формулы

$$\Delta_c = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{ci}^2}, \quad (3.21)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью  $P_d$  и числом  $m$  соответствующих  $\Delta_{ci}$ .

При  $P_d = 0,9$  коэффициент  $k = 0,95$ , при  $P_d = 0,95$ ;  $k = 1,1$ , при  $P_d = 0,99$  значение  $k$  зависит от количества суммируемых НСП. Если  $m > 4$ , то  $k = 1,45$ , если же  $m \leq 4$ , то  $k$  определяют по графику зависимости  $k = f(m, l)$ , где  $l = \frac{\Delta_{ci}'}{\Delta_{ci}''}$ , где  $\Delta_{ci}'$  – максимальная граница;  $\Delta_{ci}''$  – граница, ближайшая к  $\Delta_{ci}'$ . При практи-

ческих расчетах, не требующих максимально возможной точности, можно принимать, что если  $m = 4$ , то  $k = 1,4$ ; при  $m = 3$   $k \approx 1,3$ ; при  $m = 2$   $k \approx 1,2$ .

При косвенных измерениях НСП, имеющие место при измерениях аргументов  $X_i$ , суть частные НСП результата косвенного измерения  $\Delta_{cxi}$  :

$$\Delta_{cxi} = \frac{df}{dX_i} \Delta_{ci} . \quad (3.22)$$

Они затем суммируются так же, как и при прямых измерениях, т.е. для определения  $\Delta_c$  результата косвенного измерения в формулы (3.20) или (3.21) необходимо подставить вместо  $\Delta_{ci}$  значения  $\Delta_{cxi}$ , вычисленные по формуле (3.22).

Доверительную вероятность для вычисления  $\Delta_c$  принимают той же, что и при вычислении доверительных границ случайной погрешности результата измерения.

### 3.3 Случайные погрешности измерений

#### 3.3.1 Описание случайных погрешностей измерений

Случайные погрешности, в отличие от систематических, проявляются случайным образом, то есть они по своему назначению и знаку неопределенны. Поэтому их нельзя исключить из результатов измерений подобно систематическим.

Наличие случайных погрешностей определяет такое понятие как достоверность измерений. Под достоверностью понимают качественную характеристику измерений, отражающую близость к нулю случайных погрешностей. Следовательно, чтобы обеспечить достоверность измерений, необходимо оценить значения случайных погрешностей с некоторой вероятностью и благодаря этому учесть их влияние на оценку истинного значения измеряемой величины. Это можно сделать, используя теорию вероятностей и математическую статистику.

Для описания свойств случайной величины в теории вероятностей используют понятие функции (закона) распределения вероятностей случайной ве-

личины (в нашем случае случайной погрешности  $\Delta$ ). Различают две формы описания функции распределения: интегральную и дифференциальную. В метрологии чаще применяют дифференциальную функцию распределения, называемую плотностью распределения вероятностей, так как она более наглядно описывает свойства случайной погрешности. Однако для определения функций распределения необходимо проведение весьма кропотливых научных исследований и обширных вычислительных работ. Значительно чаще бывает достаточно охарактеризовать случайные погрешности с помощью ограниченного числа специальных величин, называемых *моментами*. Моменты являются *начальными*, если величины усредняют, и *центральными*, если величины усредняют от центра распределения.

Для оценки случайных погрешностей измерения чаще всего используются следующие величины (моменты).

Из начальных моментов чаще всего используется первый момент, который является *математическим ожиданием*  $m_x$  случайной величины  $X_i$ , определяемой по формуле

$$m_1 = m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3.23)$$

где  $n$  – количество наблюдений.

Из центральных моментов особенно важную роль играет второй момент, называемый *дисперсией*  $D_x$ :

$$\mu_2 = D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - m_x)^2. \quad (3.24)$$

Дисперсия характеризует рассеяние погрешностей относительно математического ожидания. Она имеет размерность квадрата погрешности измерения, что не совсем удобно для характеристики погрешности. Поэтому обычно используют среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x = \sqrt{D_x}$ , которое имеет размерность самой погрешности. Нормальное распределение полностью характеризуется значениями  $m_x$  и  $\sigma_x$ .

### 3.3.2 Оценка случайных погрешностей прямых измерений с многократным наблюдением

Приемы оценки случайных погрешностей результатов измерений с многократными наблюдениями различны для равноточных и неравноточных измерений. Равноточными называют измерения, результаты наблюдений которых получены одним оператором, в одинаковых условиях и с помощью одного и того же СИ. Однако в ряде случаев возникает необходимость нахождения оценки измеряемой величины на основании результатов наблюдений, полученных разными операторами в различных условиях, с применением различных СИ (и даже различных методов измерений). Такие измерения называют неравноточными, т. к. результаты наблюдений будут иметь различную точность. При оценке случайных погрешностей и тех и других измерений будем полагать, что систематические погрешности тем или иным способом исключены из результатов наблюдений, т. е. они являются исправленными.

Приемы оценки случайных погрешностей прямых равноточных измерений стандартизированы и регламентируются стандартом.

За результат измерения принимается значение оценки математического ожидания  $\hat{m}_x$ , называемого чаще средним арифметическим результатов наблюдений и обозначаемое  $\bar{X}$ . Это значение определяется по формуле:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \hat{m}_x. \quad (3.25)$$

Оценка (3.25) является состоятельной, несмещенной и эффективной оценкой истинного значения измеряемой величины. *Состоятельной* называют оценку, которая приближается (сходится по вероятности) к истинному значению оцениваемой величины при  $n \rightarrow \infty$ . *Несмещенной* является оценка, математическое ожидание которой равно истинному значению оцениваемой величины. *Эффективной* является несмещенная оценка, для которой  $\hat{D}_x = \min$ .

Случайная погрешность результата каждого наблюдения характеризуется значением среднего квадратического отклонения (СКО)  $\sigma_x$ , определяемого по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - m_x)^2} . \quad (3.26)$$

Так как при практических расчетах вместо  $m_x$  применяется его оценка  $\bar{X}$ , то мы можем определить лишь значения

$$V_i = X_i - \bar{X} , \quad (3.27)$$

где  $V_i$  – *случайные отклонения* результатов отдельных наблюдений.

Следовательно, и для расчета оценки СКО ( $\hat{\sigma}_x$ ) вместо (3.26) должна применяться следующая формула:

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n V_i^2} . \quad (3.28)$$

Известно, что СКО среднего значения результатов измерения  $\sigma_{\bar{X}}$ , которые характеризует степень разброса  $\bar{X}$ ,

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} . \quad (3.29)$$

Так как  $\bar{X}$  выступает оценкой истинного значения измеряемой величины, т. е. является результатом измерения, то  $\sigma_{\bar{X}}$  называют также СКО результата измерения.

С учетом (3.28) оценка СКО результата измерения  $\hat{\sigma}_{\bar{X}}$ , будет определяться по формуле

$$\hat{\sigma}_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n V_i^2} . \quad (3.30)$$

Значения  $\bar{X}$  и  $\hat{\sigma}_{\bar{X}}$  называются точечными и всегда являются приближенными, так как получены на основании ограниченного числа наблюдений. Кроме того, они не содержат никаких сведений о вероятности этих оценок, хотя и позволяют оценить числовые значения результата измерения и его случайную погрешность. Поэтому теперь необходимо перейти от точечных оценок к так называемым интервальным оценкам, которые связаны с определением доверительных границ случайной погрешности результата измерения.

*Доверительные границы* – это верхняя и нижняя границы интервала, внутри которого с заданной вероятностью  $P_d$  находится погрешность результата измерения, а следовательно, и истинное значение измеряемой величины.

Для нахождения доверительных границ случайной погрешности необходимо умножить  $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$  на коэффициент  $t$ , зависящей в общем случае от доверительной вероятности  $P_d$ , числа наблюдений  $n$  и закона распределения случайных погрешностей, т. е.

$$\overset{\circ}{\Delta} = t \cdot \hat{\sigma}_{\bar{x}}. \quad (3.31)$$

Для наиболее универсального нормального распределения плотности вероятности случайных погрешностей (распределения Гаусса, для  $n < 30$  – распределения Стьюдента) значения  $t$  определены численным решением интеграла вероятности, табулированы в зависимости от  $P_d$  и  $n$  и приведены в таблице 3.1.

При технических измерениях значение  $\overset{\circ}{\Delta}$  следует определять для  $P_d = 0,95$ . В тех случаях, когда измерение нельзя повторить, помимо границ, соответствующих  $P_d = 0,95$ , допускается указывать границы для  $P_d = 0,99$ . В особых случаях, например при измерениях, результаты которых имеют значения для здоровья людей, допускается вместо  $P_d = 0,99$  принимать более высокую доверительную вероятность.

Таблица 3.1 – Значение коэффициента  $t$  для распределения Стьюдента с  $(n-1)$  степенями свободы

$n-1$	$P_d = 0,95$	$P_d = 0,99$	$n-1$	$P_d = 0,95$	$P_d = 0,99$
3	3,182	5,841	16	2,120	2,921
4	2,776	4,604	18	2,101	2,878
5	2,571	4,032	20	2,086	2,845
6	2,447	3,707	22	2,074	2,819
7	2,365	3,499	24	2,064	2,797
8	2,306	3,355	26	2,056	2,779
10	2,228	3,169	28	2,048	2,763
12	2,179	3,055	30	2,043	2,750
14	2,145	2,997	$\infty$	1,960	2,576

При числе результатов наблюдений  $n > 50$  для проверки принадлежности их к нормальному распределению предпочтительным являются критерии  $\chi^2$  Пирсона или  $\omega^2$  Мизеса–Смирнова. При  $15 < n < 50$  предпочтительным является составной критерий. При  $n \leq 15$  принадлежности результатов наблюдений к нормальному распределению не проверяют, и рекомендуется значение  $t$  принимать для нормального распределения. В этом случае надежность оценки  $\overset{\circ}{\Delta}$  повышается, т. к. при  $P > 0,85$  значения  $t$  для нормального распределения максимальны по сравнению со значениями  $t$  для других распределений.

В заключение рассмотрим так называемый критерий грубых погрешностей. Оказывается, что при  $n \geq 30$  и  $P = 0,9973$  значение коэффициента  $t = 3$ .

Это значение  $t$  считают предельно возможным при определении  $\Delta$  по формуле (3.31), так как вероятность появления большего значения очень мала (0,0027). Поэтому критерий «трех сигм» принят в качестве критерия грубых погрешностей.

Если модуль случайного отклонения  $|V_i|$  окажется больше трех среднеквадратических отклонений результата наблюдения, то такое наблюдение содержит грубую погрешность и должно быть исключено из ряда при обработке результатов наблюдений. Математически это выражается следующим образом:

$$|V_i| > 3\hat{\sigma}_x. \quad (3.32)$$

Существуют и другие критерии, но этот наиболее широко применяется в метрологической практике из-за своей простоты и надежности.

### 3.3.3 Оценка случайных погрешностей косвенных измерений с многократными наблюдениями

Так как результаты прямых измерений аргументов содержат погрешности, то и результат косвенного измерения также будет содержать погрешность. Поэтому, как и в случае прямых измерений, необходимо оценить истинное значение измеряемой величины  $Q$  и доверительные границы погрешности результата косвенного измерения.

За результат косвенного измерения принимается величина  $\bar{Q}$ . Она вычисляется при подстановке в формулу (1.6) средних арифметических значений аргументов, полученных с помощью формулы (3.15):

$$Q = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_m). \quad (3.33)$$

Свойства оценок  $\bar{Q}$  и  $\bar{X}$  аналогичны.

Оценка СКО результата косвенного измерения:

$$\hat{\sigma}_{\bar{Q}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot \hat{\sigma}_{\bar{X}_i}^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m \frac{\partial f}{\partial X_i} \frac{\partial f}{\partial X_j} \hat{\sigma}_{\bar{X}_i} \hat{\sigma}_{\bar{X}_j} \hat{R}_{ij}}, \quad (3.34)$$

где  $\frac{\partial f}{\partial X_i} \frac{\partial f}{\partial X_j}$  – частные производные, вычисляемые при  $X_i = \bar{X}_i$  и  $X_j = \bar{X}_j$ ;

$\hat{R}_{ij}$  – оценка коэффициента корреляции между погрешностями измерения величин  $X_i$  и  $X_j$ . Величина

$$\frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot \hat{\sigma}_{\bar{X}_i} = \hat{E}_{\bar{X}_i} \quad (3.35)$$

называется частной погрешностью косвенного измерения. Значение производной  $\frac{\partial f}{\partial X_i}$  при  $X_i = \bar{X}_i$  характеризует «вес» этой погрешности в оценке  $\hat{\sigma}_{\bar{Q}}$ , т. е. является весовым коэффициентом (иногда он называется также коэффициентом влияния).

Коэффициент корреляции определяет, как известно, степень статистической связи между случайными величинами, в нашем случае, между случайными



ми погрешностями измерения величин  $X_i$  и  $X_j$ . Его возможные значения лежат в интервале

$$-1 \leq \hat{R}_{ij} \leq +1 . \quad (3.36)$$

Как видно из (3.36) в процессе обработки результатов наблюдений при косвенных измерениях могут встретиться два частных случая.

Первый случай.  $\hat{R}_{ij} = 0$  – случай независимых частных погрешностей. Он имеет место, когда  $X_i$  и  $X_j$  измеряют с помощью различных СИ в разное время, разными операторами и т. п. В этом случае формула (3.34) упрощается и с учетом (3.28) принимает вид

$$\hat{\sigma}_{\bar{Q}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \hat{E}_{\bar{X}_i}^2} . \quad (3.37)$$

Второй случай.  $\hat{R}_{ij} \neq 0$  – случай зависимых частных погрешностей. Он имеет место, когда  $X_i$  и  $X_j$  измеряют с помощью однотипных СИ, одним оператором, при одновременном изменении влияющих величин и т. п.,  $\hat{\sigma}_{\bar{Q}}$  определяется из общей формулы (3.34), но предварительно определяется оценка  $\hat{R}_{ij}$  по формуле

$$\hat{R}_{ij} = \frac{1}{(n-1)\hat{\sigma}_{\bar{X}_i}\hat{\sigma}_{\bar{X}_j}} \sum_{k=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_i)(X_{jk} - \bar{X}_j) , \quad (3.38)$$

где  $n$  – наименьшее из чисел наблюдений  $X_{ik}$  и  $X_{jk}$ .

Если  $\hat{R}_{ij} > 0$  (положительная корреляция), то одна из погрешностей возрастает при увеличении другой, если же  $\hat{R}_{ij} < 0$  (отрицательная корреляция) – тенденция будет обратной.

Доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения определяются по формуле, аналогичной прямым измерениям

$$\overset{\circ}{\Delta} = t \cdot \hat{\sigma}_{\bar{Q}} . \quad (3.39)$$

Коэффициент Стьюдента  $t$  выбирается следующим образом. Если  $n \geq 30$ , значение  $t$  определяется сразу из таблицы 3.1, как и при прямых измерениях. Если же  $n < 30$ , то предварительно нужно определить так называемое «эффективное» число степеней свободы распределения Стьюдента, учитываемое затем при использовании таблицы 3.1:

$$n_{\text{эфф}} = \frac{\left( \sum_{i=1}^m \hat{E}_{\bar{X}_i} \hat{\sigma}_{\bar{X}_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i - 1} \hat{E}_{\bar{X}_i}^2 \hat{\sigma}_{\bar{X}_i}^2} , \quad (3.40)$$

где  $n_i$  – число наблюдений при прямых измерениях  $X_i$ .

В заключение рассмотрим так называемый критерий ничтожных погрешностей.

С учетом весовых коэффициентов не все частные погрешности косвенного измерения одинаково влияют на величину суммарной погрешности косвенного измерения. Некоторые из них могут быть значительно меньше других, а поскольку значение погрешности всегда должно округляться до двух значащих цифр, они не будут оказывать заметного влияния на значение итоговой погрешности. Таким образом, с учетом правила округления частная погрешность считается ничтожной, если она изменяет суммарную погрешность не более чем на 5 %.

Если в равенстве (3.37)  $k$ -я частная погрешность ничтожна, то

$$1,05\hat{\sigma}_{\bar{Q}} > \sqrt{\sum_{i=1}^m \hat{E}_{\bar{X}_i}^2 + \hat{E}_k^2}. \quad (3.41)$$

Возведя обе части неравенства (3.41) в квадрат с учетом (3.37), получим

$$1,1025\hat{\sigma}_{\bar{Q}}^2 > \hat{\sigma}_{\bar{Q}}^2 + \hat{E}_k^2,$$

откуда следует, что

$$\hat{E}_k < \frac{1}{3}\hat{\sigma}_{\bar{Q}}. \quad (3.42)$$

Это неравенство в метрологии называется *критерием ничтожных погрешностей*, а сами погрешности, отвечающие условию (3.42), называют *ничтожными* или *ничтожно малыми*.

Использование критерия ничтожных погрешностей при оценке погрешностей косвенных измерений позволяет найти те величины (аргументы), повышение точности измерения которых позволит уменьшить суммарную погрешность результата, и те, точность измерения которых повышать не имеет смысла, так как их частные погрешности и без того ничтожно малы.

### 3.3.4 Обработка результатов многократных наблюдений

Рассмотренные основные положения теории погрешностей и расчетные формулы позволяют составить следующий алгоритм обработки результатов многократных наблюдений при равноточных прямых и косвенных измерениях.

1 Произвести обнаружение, оценку и исключение систематических погрешностей из результатов наблюдений (исправление результатов наблюдений). Неисключенные систематические погрешности должны быть просуммированы между собой для получения доверительных границ неисключенной систематической погрешности  $\Delta_c$ .

2 Проверить принадлежность исправленных результатов к нормальному распределению или оно таковым принимается.

3 При прямых измерениях по формуле (3.25) рассчитать значение  $\bar{X}$ , а при косвенных измерениях – значения  $\bar{X}_i$  и  $\bar{X}_j$ .

4 По формуле (3.27) вычислить случайные отклонения  $V_i$  и с помощью соотношения

$$\sum_{i=1}^n V_i \approx 0$$

проверить правильность расчетов  $\bar{X}, \bar{X}_i, \bar{X}_j$  и  $V_i$ .

5 По формуле (3.28) вычислить оценки СКО результатов наблюдений  $\hat{\sigma}_X, \hat{\sigma}_{X_i}, \hat{\sigma}_{X_j}$ .

6 С помощью критерия (3.32) или другого проверить наличие грубых погрешностей. Наблюдения, содержащие грубую погрешность, исключаются из ряда, и вычисления по пп. 3–5 следует повторить.

7 По формуле (3.30) вычисляются оценки  $\hat{\sigma}_X, \hat{\sigma}_{X_i}, \hat{\sigma}_{X_j}$ .

8 Для косвенных измерений по формуле (3.33) рассчитать  $\bar{Q}$  и по формуле (3.34) оценку  $\hat{\sigma}_{\bar{Q}}$ .

9 По заданной доверительной вероятности  $P_d$  и числу наблюдений  $n$  определить коэффициент Стьюдента  $t$ .

10 По формуле (3.31) для прямых измерений или по формуле (3.39) для косвенных рассчитать доверительные границы случайной погрешности результата измерения  $\overset{\circ}{\Delta}$ .

11 Определить доверительные границы суммарной погрешности результата измерения  $\Delta$ . В начале вычислить отношение  $\frac{\Delta_c}{\hat{\sigma}_{\bar{X}}}$ . Если оно меньше 0,8,

то значением  $\Delta_c$  можно пренебречь по сравнению с  $\overset{\circ}{\Delta}$  и принять, что  $\Delta = \overset{\circ}{\Delta}$ .

Если отношение больше 8, то можно пренебречь значением  $\overset{\circ}{\Delta}$  и принять, что  $\Delta = \Delta_c$ . Если же эти неравенства не выполняются ( $0,8 \leq \frac{\Delta_c}{\hat{\sigma}_{\bar{X}}} \leq 8$ ), то  $\Delta$  определяется по формуле

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma}, \quad (3.43)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешности, определяемой по формуле

$$K = \frac{\overset{\circ}{\Delta} + \Delta_c}{\hat{\sigma}_{\bar{X}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta_{ci}^2}{3}}}; \quad (3.44)$$

$S_{\Sigma}$  – оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения, определяемая по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta_{c_i}^2}{3} + \hat{\sigma}_{\bar{x}}^2}. \quad (3.45)$$

Таким образом, подставив (3.44) и (3.45) в (3.43), получим

$$\Delta = \frac{\Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}}{\hat{\sigma}_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta_{c_i}^2}{3}}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta_{c_i}^2}{3} + \hat{\sigma}_{\bar{x}}^2}. \quad (3.46)$$

На практике пользуются упрощенной формулой вида

$$\Delta = \sqrt{\overset{\circ}{\Delta}^2 + \Delta_c^2}. \quad (3.47)$$

Доказано, что погрешность определения  $\Delta$  по формуле (3.47) по сравнению с общей (3.46) не превышает 10 % и может считаться универсальной для всех видов измерений.

12 Записывается окончательный результат измерений по одной из стандартных форм.

### 3.3.5 Оценка погрешностей измерений с однократными наблюдениями

Как уже неоднократно подчеркивалось, число наблюдений при практическом проведении измерений всегда ограничено и чем сложнее эксперимент и выше его стоимость, тем оно меньше. В практике измерений зачастую приходится ограничиваться измерениями с однократными наблюдениями (однократные измерения). Характерным примером однократных измерений являются измерения, выполняемые с помощью рабочих СИ и не связанные с передачей единиц физических величин.

Для однократных измерений не нужна статистическая обработка результатов наблюдений и это значительно упрощает оценку погрешностей. Более того, при технических измерениях должна быть заранее установлена процедура, соблюдение которой обеспечивает получение результата измерения с погрешностью, не превышающей допустимую. Ожидаемую погрешность результата измерения оценивают перед измерением (априорная оценка), используя предварительные данные об измеряемой величине, применяемых методе измерения и СИ, а также об условиях проведения измерения. Именно эта априорная информация делает возможным проведение однократных измерений и обеспечивает их *сходимость* (близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях) и *воспроизводимость* (близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях).

Для априорной оценки ожидаемой погрешности результата однократного измерения рекомендуется следующий алгоритм.

1 Проводится анализ составляющих погрешности результата измерения по источникам возникновения. Методические погрешности оцениваются либо на основании изучения теоретических зависимостей, описывающих исследуемый объ-

ект и метод измерений, либо экспериментальным путем при измерении одной и той же величины разными методами. Для оценки инструментальных и внешних погрешностей используют данные об основных и дополнительных погрешностях применяемых СИ. Наконец, субъективные погрешности оцениваются, как правило, экспериментальным путем. При этом оценка систематических погрешностей дается их границами (пределами), а случайных – значениями СКО.

2 Проводится исключение систематических погрешностей, а неисключенные погрешности суммируются для определения  $\Delta_c$ .

3 Оценивается СКО результата измерения (предполагается, что выявленные случайные погрешности являются независимыми). Поэтому для оценки  $\hat{\sigma}_{\bar{y}}$  используется формула (3.37), а для оценки  $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$  – (3.30).

4 С помощью коэффициента Стьюдента находятся доверительные границы случайной погрешности  $\overset{\circ}{\Delta}$ . Для однократных измерений приняты следующие значения  $t$ : при  $P_d = 0,95$   $t = 2$ , а при  $P_d = 0,99$   $t = 2,6$ .

5 Проводится оценка доверительных границ ожидаемой погрешности результата измерения. Для прямых однократных измерений рекомендуется вычислять отношение  $\frac{\Delta_c}{\hat{\sigma}_{\bar{x}}}$  (по аналогии с многократными наблюдениями). Если

оно меньше 0,5, можно принять  $\Delta = \overset{\circ}{\Delta}$ , а при  $\frac{\Delta_c}{\hat{\sigma}_{\bar{x}}} > 8$  принимают  $\Delta = \Delta_c$ . Внут-  
ри этого интервала значение  $\Delta$  можно вычислить по формуле

$$\Delta = 0,8(\Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}) \quad , \quad (3.48)$$

где коэффициент 0,8 учитывает малую вероятность того, что  $\Delta_c$  и  $\overset{\circ}{\Delta}$  одновременно будут иметь свои граничные значения. В случае косвенных измерений правильнее пользоваться универсальной формулой (3.47).

Если полученное значение  $\Delta$  оказалось больше допускаемой погрешности  $\Delta_d$ , необходимо либо обратиться к другому методу измерений, либо заменить СИ (или уточнить их метрологические характеристики), либо, наконец, изменить определенным образом условия проведения измерения. Если же  $\Delta < \Delta_d$ , то установленная процедура обеспечивает получение результата измерения с требуемой точностью.

### 3.3.6 Характеристики погрешности и формы представления результатов измерений

Методические указания МИ 1317 устанавливают следующие группы характеристик погрешности измерений:

– *нормы погрешности измерений*, задаваемые в качестве требуемых или допускаемых характеристик погрешностей измерений ( $\Delta_p$ );

– *приписанные характеристики погрешности измерений*, присваиваемые любому результату измерений из совокупности измерений, выполняемых по одной и той же аттестованной МВИ ( $\Delta_m$ );

– *статистические оценки погрешности измерений*, отражающие близость отдельного, экспериментально полученного результата измерений к истинному значению измеряемой величины ( $\hat{\Delta}$ ).

При массовых технических измерениях (подготовка производства, разработка, испытания, производство, контроль, эксплуатация продукции, товарообмен и др.) в основном применяются нормы и приписанные погрешности измерений  $\Delta_p$  и  $\Delta_m$ .

При измерениях, выполняемых при проведении научных исследований и метрологических работ (определение физических констант, аттестации СИ и т. п.), часто применяются статистические оценки погрешности измерений  $\hat{\Delta}$ , которые представляют собой статистические (выборочные) характеристики случайной величины – погрешности измерений.

В качестве характеристик погрешностей, которые являются показателями точности измерений, установлены:

– среднее квадратическое отклонение погрешности измерения  $\sigma(\Delta)$ ;

– границы: нижняя  $\Delta_n$  и верхняя  $\Delta_v$ , в пределах которых погрешность измерений  $\Delta$  находится с заданной вероятностью  $P$ ;

– характеристики случайной и систематической составляющих погрешности измерений.

В случаях, когда результаты измерений используются совместно с другими результатами измерений, а также при расчетах погрешностей величин, функционально связанных с результатами измерений (например результатов косвенных измерений и др.), применяются, в основном, точечные характеристики и оценки, когда уже результаты измерений являются окончательными – применяются интервальные характеристики.

Характеристики погрешностей измерения представляются с указанием совокупности условий, для которых они действительны (диапазон значений измеряемой величины, диапазон скоростей ее изменения, частотные спектры, диапазоны значения влияющих величин и др.) совместно с результатом измерений, к которому они относятся.

Конкретный выбор характеристик погрешностей измерений и формы представления их результатов определяются назначением измерений и характером использования их результатов. В качестве примера формы представления результатов измерений без указания условий их проведения можно привести следующую, которая в основном используется в практике измерений.

Если точность измерений выражается доверительным интервалом, внутри которого с известной вероятностью находится истинное значение измеряе-

мой величины, то используется следующая форма представления результата измерения:

$$A; \Delta \text{ от } \Delta_{\text{н}} \text{ до } \Delta_{\text{в}}; P,$$

где  $A$  – результат измерения, значение которого определяется видом измерений.

При одинаковых числовых значениях  $\Delta_{\text{н}}$  и  $\Delta_{\text{в}}$  (без учета знаков) результат измерения записывается в виде

$$A \pm \Delta; P.$$

Если числовые значения  $\Delta_{\text{н}}$  и  $\Delta_{\text{в}}$  неодинаковы, то они должны указываться каждый отдельно со своим знаком.

Совместно с результатом измерений, при необходимости приводятся дополнительные данные и условия измерений (для результатов измерений изменяющейся во времени величины указываются моменты времени, соответствующие каждому из представленных результатов измерений; для результатов измерений с многократными наблюдениями указывается число наблюдений и интервал времени, в течение которого они проведены, и т. п.).

При выражении результатов измерений в числовой форме должны выполняться обязательно следующие правила округления результатов:

– характеристики погрешности и их статистические оценки выражаются числом, содержащим не более двух значащих цифр; допускается выражать их числом, содержащим одну значащую цифру, если старший значащий разряд равен трем и более;

– числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются;

– если первая из отбрасываемых (или заменяемых нулями) цифр меньше пяти, то последняя остающаяся цифра не изменяется; если же первая из отбрасываемых цифр равна или больше пяти, то последняя остающаяся цифра увеличивается на единицу.

## 4. Метрологическое обеспечение

### 4.1 Основные положения метрологического обеспечения

*Метрологическое обеспечение (МО)* – это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Таким образом, МО имеет научную, техническую и организационную основы.

*Научной основой* МО является метрология.

*Технической основой* МО являются следующие системы:

– государственных эталонов единиц физических величин, обеспечивающая воспроизведение единиц с наивысшей точностью;

– передачи размеров единиц физических величин от эталонов рабочим СИ;

– разработки, постановки на производство и выпуска в обращение рабочих СИ, обеспечивающих определение с требуемой точностью характеристик продукции, технологических процессов и других объектов;

– обязательных государственных испытаний СИ, предназначенных для серийного или массового производства;

– обязательной государственной и ведомственной поверки и калибровки, или метрологической аттестации СИ, обеспечивающая единообразие СИ при их изготовлении, эксплуатации и ремонте;

– стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов, обеспечивающая достоверными данными научные исследования, разработку конструкции изделий и технологических процессов их изготовления и т.д.;

– разработки, стандартизации и аттестации методик выполнения измерений.

Перечисленные выше системы МО измерений регламентированы комплексом стандартов Системы обеспечения единства измерений (СОЕИ). Основными объектами стандартизации СОЕИ являются: термины и определения в области метрологии; единицы физических величин; нормы точности измерений и формы представления результатов измерений; номенклатура нормируемых метрологических характеристик СИ; методики выполнения измерений; государственные эталоны и поверочные схемы, а также методы и средства поверки и калибровки СИ; организация и порядок проведения государственных испытаний, поверки, калибровки и метрологической аттестации СИ и т. д.

*Организационной основой МО* является метрологическая служба Республики Беларусь.

*Метрологическая служба (МС)* – это совокупность организаций и (или) функционально связанных между собой юридических лиц, их структурных подразделений либо структурное подразделение юридического лица, деятельность которых направлена на обеспечение единства измерений. *Метрологическое обеспечение измерений* – это деятельность метрологических и других служб, направленная на создание в стране необходимых эталонных образцов и рабочих средств измерений; на правильный их выбор и применение; на разработку и применение метрологических правил и норм; на выполнение других метрологических работ, которые необходимы для обеспечения требуемого качества измерений на конкретном рабочем месте, на предприятии, в министерстве, ведомстве и в стране в целом.

В зависимости от области, на которую распространяется метрологическое обеспечение (МО), говорят о глобальном или локальном МО. *Глобальное МО* охватывает всю страну, а через систему международных организаций и весь мир. *Локальное МО* может распространяться только на одно предприятие (тогда говорят «МО предприятия»), отрасль (МО ведомства, министерства, государственного органа управления) или какую-то группу однородной продукции (например, МО телекоммуникационных систем, МО каких-либо средств и т. п.). В зависимости от «области покрытия» меняются характер деятельности



МО и его структурная организация. Связь измерений и метрологического обеспечения отражает рисунок 4.1.

Разнообразные виды деятельности по МО должны быть скоординированы, взаимосвязаны и согласованы как организационно (структурно), так и с помощью определенных правил и норм (процедурно).

Задача управления измерениями в системе МО решается разнообразными методами: *на уровне рабочих СИ* – испытаниями, поверкой, калибровкой, контролем, техническим обслуживанием и ремонтом СИ, учетом средств измерений и документальной регистрацией результатов испытаний и контроля; *на уровне методик измерений* – экспертизой и аттестацией методик выполнения измерений (МВИ); *на уровне организаций*, выполняющих поверку, калибровку и испытания, – аккредитацией испытательных, поверочных и калибровочных лабораторий (ПКИЛ); аттестацией программного обеспечения информационно-измерительных систем; аккредитацией уполномоченных органов, которые аккредитуют ПКИЛ, и др.

Эти функции отражены на рисунке 4.1 в виде системы контроля и надзора, которая выполняет функцию обратной связи (см. пунктирные линии) и сравнивает эффективность влияния различных видов метрологической деятельности на качество измерений.

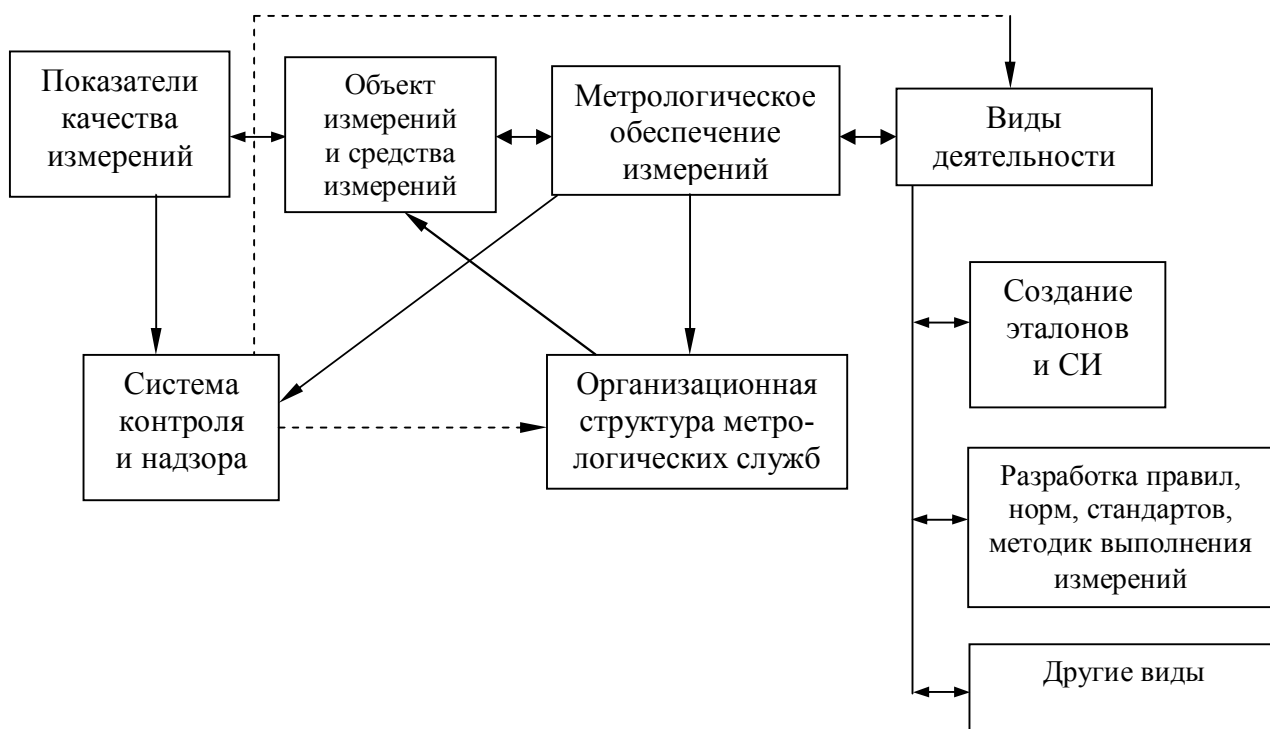


Рисунок 4.1 – Структурная схема видов работ по метрологическому обеспечению

## 4.2 Государственная система обеспечения единства измерений

### 4.2.1 Цели и задачи СОЕИ

*Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь (СОЕИ)* – это согласованная, официально признанная организационная и научно-техническая система, представляющая собой совокупность законов и норм, правил и положений, эталонов и рабочих СИ, органов и служб, деятельность которых направлена на достижение единства и требуемой точности измерений.

Таким образом, СОЕИ – это система, которая обеспечивает выполнение всех задач глобального МО. Основные положения о СОЕИ, цели, задачи и функции этой системы приведены в СТБ 8000-2000 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь».

*Основными целями СОЕИ являются:*

– обеспечение единства измерений как одного из важнейших элементов единого рынка продукции, работ и услуг в стране (когда результаты измерений, выполненные в системе, выражены в узаконенных единицах физической величины, имеют *прослеживаемость* до национальных и международных эталонов, гарантируют степень точности и достоверности и являются основанием для принятия решений в экономике, промышленности, торговле, науке, здравоохранении, охране окружающей среды, оценке и контроле продукции и природных ресурсов, обороне, органах безопасности, на транспорте, в связи и других отраслях). Здесь, как и ранее, термин *прослеживаемость* – это такая процедура документирования СИ, при которой ясны последовательность передачи размера единицы и то, каким образом она документально оформлена;

– защита интересов населения и государства от последствий неточных и неправильных измерений;

– повышение качества товаров и услуг и обеспечение конкурентоспособности изделий на внутреннем и международном рынках;

– содействие безопасности государства, в том числе экономической безопасности;

– развитие техники измерений в соответствии с уровнем технико-экономического развития в стране;

– достоверный учет материальных, энергетических и природных ресурсов;

– правильная (сопоставимая) оценка параметров среды обитания;

– установление должной степени доверия в международных экономических отношениях к результатам измерений при проведении калибровки, поверки и испытаний средств измерений.

*Основными задачами СОЕИ являются:*

– разработка научно-методических, правовых и организационных основ деятельности;

– стандартизация основных положений, правил, требований и норм этой деятельности;

– организация и проведение научных исследований по использованию новейших достижений науки и техники для создания и совершенствования методов и средств измерений высшей точности (эталонов) и определения значенных физических констант; создание, хранение и сличение национальных и исходных эталонов; установление порядка передачи размеров единиц от эталонов рабочим СИ;

– разработка новых методов, средств и методик выполнения измерений;

– разработка требований к порядку, организации и проведению испытаний, поверки, калибровки и метрологической аттестации СИ; метрологической аттестации методик выполнения измерений; метрологической экспертизы конструкторской, технической и проектной документации и т. п.;

– создание системы государственного надзора и контроля за производством, состоянием, применением и ремонтом СИ, а также за соблюдением метрологических норм и правил при выполнении этих операций;

– организация и осуществление подготовки и повышения квалификации специалистов в области метрологии;

– организация работы по международному сотрудничеству в области метрологии для обеспечения единства и требуемой точности измерений, которые необходимы для международной торговли, научно-технического и экономического сотрудничества.

#### 4.2.2 Фундаментальные основы системы СОЕИ

С точки зрения системного подхода СОЕИ представляет собой сложный объект, со сложной внутренней структурой и разнообразным взаимодействием с внешней средой. Поэтому его можно представить в виде совокупности взаимосвязанных, взаимодействующих и взаимодополняющих друг друга элементов, которые составляют законодательную, теоретическую, техническую и организационную основу функционирования системы.

*Законодательной основой* являются: закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений», указы Президента страны, постановления правительства («О единицах измерений, применяемых в Республике Беларусь», «Об исчислении времени в Республике Беларусь», «О лицензировании изготовления, ремонта, поверки, калибровки, продажи и проката средств измерений», «О государственном надзоре за выполнением требований стандартов, обеспечением единства измерений и контроле за соблюдением правил обязательной сертификации в Республике Беларусь» и др.), нормативные документы, утвержденные Госстандартом Республики Беларусь.

*Теоретической основой* являются: теория измерений; система единиц измерений; система терминов и определений; методы и принципы измерений; передачи размера единиц и воспроизведения размера; методы оценки и расчета метрологических характеристик; фундаментальные исследования; направленные на создание национальных и исходных эталонов величин и стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.

*Технической основой* являются: подсистема воспроизведения единиц (это система национальных эталонов); подсистемы передачи размера единицы (используются для передачи размера от эталонов к рабочим средствам измерений, используемым при проведении поверок, метрологической аттестации, калибровок и т. п.); организация в стране производства СИ, включая разработку и государственные испытания собственных СИ и собственных стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (СО); подсистема передачи стандартов времени и частоты, включая ее создание и функционирование.

*Организационная основа* включает в себя: создание принципов и структуры построения метрологической службы в стране; организацию государственного метрологического надзора и контроля; подготовку метрологических кадров, а также правил и норм их функционирования; разработку нормативных документов, которые обеспечивают слаженное взаимодействие всех органов структуры СООИ. Кроме этого на государственном уровне предусмотрен алгоритм взаимодействия СООИ с международными метрологическими организациями, а также с государственными системами Республики Беларусь: национальной системой подтверждения соответствия (НСПС), системой технического нормирования и стандартизации (ТНиС), национальной системой аккредитации (НСА) (поверочных, испытательных и калибровочных лабораторий) и др.

#### 4.2.3 Организационная структура СООИ

СООИ строится по иерархическому принципу. Основу ее составляет государственная метрологическая служба (ГМС), которая координирует все работы по МО в стране на всех уровнях и согласовывает свою деятельность с рекомендациями ведущих международных организаций в области метрологии.

ГМС координирует работу метрологических служб государственных органов управления, ведомств, министерств и т. п. (ВМС), которые, в свою очередь, – метрологических служб юридических лиц (подведомственных им предприятий) (МСП), как показано на рисунке 4.2.

По отдельным видам деятельности метрологические службы (ГМС, ВМС и МСП) активно взаимодействуют с системой ТНиС, НСПС и НСА Республики Беларусь и т. п. Координацию таких видов деятельности осуществляет Комитет по стандартизации Республики Беларусь.

Среди основных международных организаций, с которыми взаимодействует государственная метрологическая служба Республики Беларусь, можно назвать:

*международные организации:*

- МОЗМ (Международная организация законодательной метрологии);
- МБМВ (Международное бюро мер и весов);
- МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии);
- ИСО (Международная организация по стандартизации);
- МЭК (Международная электротехническая комиссия);

- ИМЕКО (Международная конфедерация по измерительной технике и приборостроению);
- ИЛАК (Международная организация по аккредитации лабораторий);
- региональные организации:*
- МГС СНГ (межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ);
- *CEN* (Европейский комитет по стандартизации);
- *CENELEC* (Европейский комитет по стандартизации в электротехнике);
- *ETSI* (Европейский институт телекоммуникационных стандартов);
- ЕВРОМЕТ (Европейская организация по метрологии);
- КООМЕТ (Евро-Азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений).

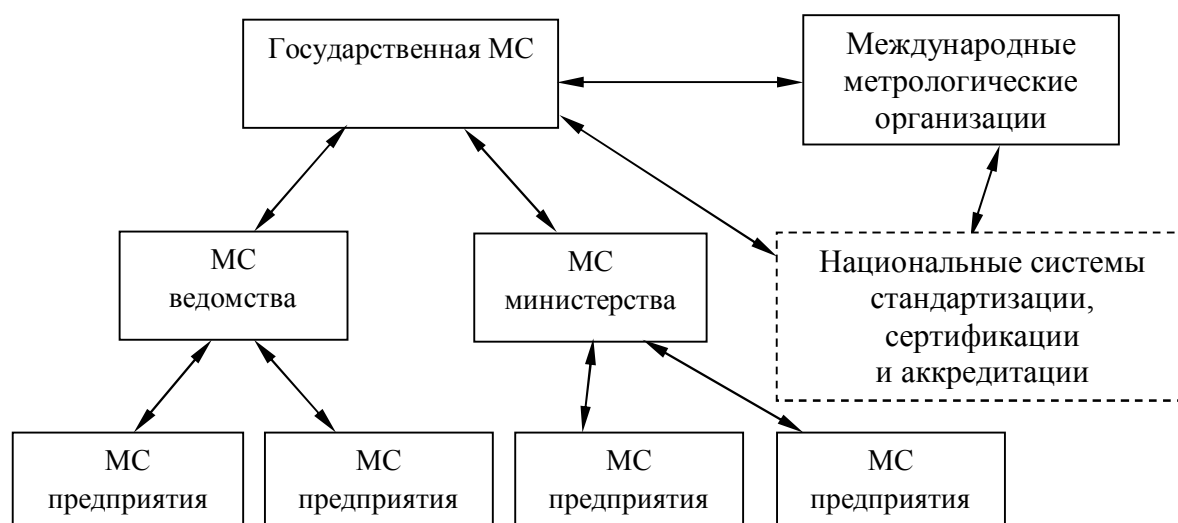


Рисунок 4.2 – Упрощенная организационная структура СОЕИ Республики Беларусь

Таким образом, метрологическая служба Республики Беларусь включает в себя органы государственной, ведомственной метрологических служб и МСП. Государственную метрологическую службу возглавляет Госстандарт Республики Беларусь.

Ведомственную МС образуют отделы министерств (ведомств), на которые возлагается руководство МС, головные и базовые организации МС. Отделы главных метрологов или другие подразделения, которые организуют работы по МО непосредственно на предприятиях и в организациях, образуют МСП.

К основным задачам МС в части МО измерений относятся: осуществление метрологического надзора и метрологического контроля, создание комплекса стандартов СОЕИ и контроль за выполнением их требований.

*Метрологический надзор* – деятельность органов МС, направленная на обеспечение единства измерений и единообразия СИ. Метрологический надзор, осуществляемый органами Государственной МС, называют государственным, а органами ведомственных МС – ведомственным контролем.

Государственный метрологический надзор включает в себя надзор за применением: единиц измерений; рабочих СИ; методик выполнения измерений; проведением государственных испытаний средств измерений, осуществлением метрологической аттестации СИ, поверки, калибровки, метрологического подтверждения пригодности методик выполнения измерений; за деятельностью юридических лиц и индивидуальных предпринимателей по производству СИ, их ремонту, реализации, передачи в аренду.

*Метрологический контроль* – совокупность работ, в ходе выполнения которых устанавливаются или подтверждаются метрологические, технические характеристики СИ, определяется соответствие СИ, МВИ требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений, а также соответствие МВИ своему назначению.

Метрологический контроль включает в себя: утверждение типа СИ; метрологическую аттестацию СИ; поверку; калибровку; метрологическое подтверждение пригодности МВИ.

#### 4.2.4 Государственная метрологическая служба

Основными задачами ГМС являются:

- проведение единой государственной политики и осуществление регулирования и управления в государстве в области метрологии;
- обеспечение функционирования и развития государственной системы стандартов в области метрологии;
- обеспечение функционирования всей СОЕИ в государстве и ответственность за ее функционирование;
- обеспечение функционирования и совершенствования систем сертификации, аккредитации и калибровки в части деятельности и контроля соответственно поверочных, испытательных и калибровочных лабораторий;
- координация и организация работы по международному сотрудничеству в области метрологии, стандартизации и аккредитации лабораторий.

Обобщенная организационная структура ГМС показана на рисунке 4.3.

ГМС входит в структуру Комитета по стандартизации Республики Беларусь (Госстандарт) и имеет статус министерства, подчиняется только правительству и выполняет межведомственную функцию. Госстандарт координирует работу национальных систем: ТНиС, НСПС и НСА. На рисунке 4.3 эти связи отмечены пунктирными линиями, т. к. эти системы непосредственно не входят в состав ГМС. Каждая система построена по иерархическому принципу, имеет собственную структуру и соответствующие органы, которые обеспечивают достижение целей и выполнение задач, поставленных перед системой.

В систему ТНиС входят органы, которые готовят документы по стандартизации, тиражируют их, обновляют и вносят изменения, участвуют в контроле соблюдения правил применения стандартов в различных областях народного хозяйства, включая и метрологическое обеспечение.

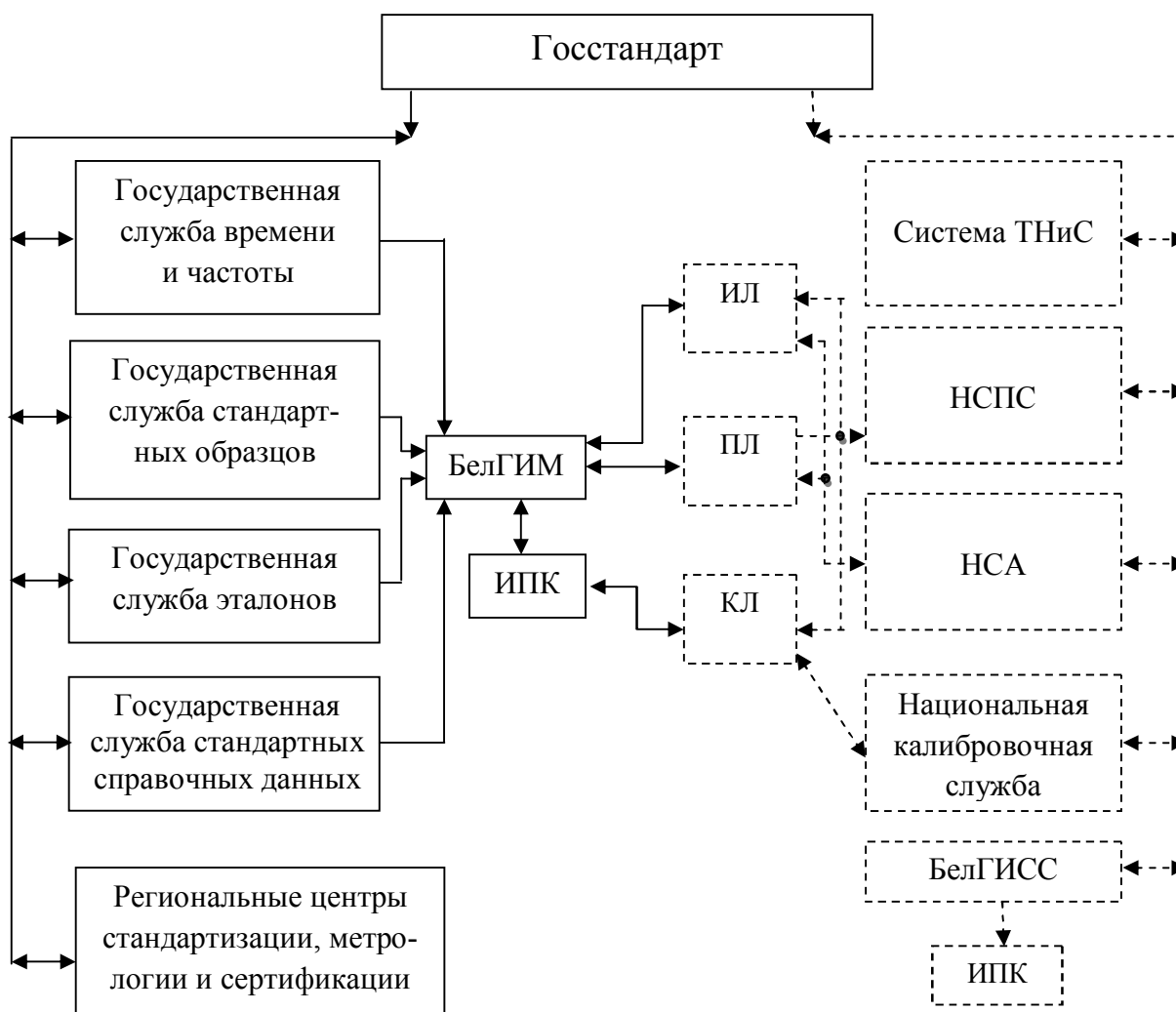


Рисунок 4.3 – Организационная структура ГМС и ее взаимодействие в СОЕИ

ГМС взаимодействует с НСПС при проведении испытаний продукции и подтверждении соответствия их параметров и характеристик, требованиям, установленным в государственных стандартах, а также при сертификации систем управления предприятием. Подразделения ГМС могут сами проводить эти испытания, а также осуществлять поверку и калибровку СИ, которые используются при этом. Но в большинстве случаев эту работу выполняют самостоятельные аккредитованные испытательные (на рисунке ИЛ), поверочные (ПЛ) и калибровочные (КЛ) лаборатории. ГМС осуществляет контроль за работой этих лабораторий непосредственно и через НСА, что обеспечивает единство и требуемую точность измерений.

НСА в соответствии с СТБ 50.01 устанавливает единую политику, принципы и правил аккредитации поверочных, калибровочных и испытательных лабораторий, а также органов по сертификации систем управления, персонала, продукции и услуг, инспекционных органов, что приводит к обеспечению единство измерений. Основным звеном НСА являются уполномоченные органы по аккредитации. Сами эти органы не проводят ни испытаний, ни поверок. Они

осуществляют аккредитацию указанных лабораторий и дают им право на выполнение определенной деятельности. Национальная калибровочная служба организует и проводит работы по калибровке СИ.

Указанные системы взаимодействуют друг с другом и с Госстандартом по разработке основных нормативных документов.

Государственная служба времени и частоты отвечает за хранение эталонов времени и частоты, их создание, эксплуатацию, за передачу эталонных сигналов времени и частоты всем заинтересованным организациям.

Государственная служба стандартных образцов отвечает за создание эталонных средств измерений, в качестве которых используются некоторые вещества и материалы с эталонными свойствами, структурой и содержанием.

Государственная служба эталонов организационно строится на базе Белорусского государственного института метрологии (БелГИМ), который является главным центром национальных эталонов и головной организацией для МС ведомств, комитетов, министерств.

Государственная служба стандартных справочных данных представляет собой банк данных о стандартных образцах свойств веществ и материалов, разработанных в международном масштабе и в Республике Беларусь.

БелГИМ – научное учреждение, призванное разрабатывать новые методы измерения физических величин (ФВ), новые методики, сами эталоны, с учетом новейших достижений науки и техники на современном этапе. На БелГИМ возлагается ведение всей научной документации по эталонам, по их хранению, эксплуатации и т. д.

БелГИМ является головным органом по разработкам в области законодательной метрологии. Он готовит основные нормативные документы; имеет свою информационную базу. Кроме того, БелГИМ активно участвует в работах по проведению государственных испытаний новых типов средств измерений и стандартных образцов, их поверки, метрологической аттестации. В рамках регионального и международного сотрудничества разрабатывает гармонизированные с Международной Системой единиц величин стандарты, нормативные документы, инструкции и т. п., организует их публикацию, ведет Реестр утвержденных типов СИ, а также Реестр национальных и исходных эталонов.

БелГИМ выполняет обязанности головной организации Государственной службы стандартных образцов, Государственной службы стандартных справочных данных, Государственной службы времени и частоты, Национальной калибровочной службы, Органа по аккредитации поверочных, испытательных и калибровочных лабораторий, головной организации по стандартизации в области метрологии, уполномоченного органа по сертификатам Международной организации по законодательной метрологии (МОЗМ). В БелГИМ сосредоточены национальные и межгосударственные стандарты, а также международные документы, относящиеся к сфере законодательной метрологии.

Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (БелГИСС) разрабатывает нормативные документы в области систем стандартизации и сертификации. В нем есть органы по сертификации, как отдельных



видов продукции, так и производственных систем в целом. Это крупнейший информационный центр, в котором сосредоточены все стандарты, международные документы в области сертификации и стандартизации.

Подготовка кадров и повышение квалификации работников, как государственной метрологической службы, так и метрологических служб государственных органов управления и юридических лиц, осуществляется в рамках Белорусского государственного института повышения квалификации и переподготовки кадров (ИПК) Госстандарта.

Региональными метрологическими центрами Госстандарта являются 15 Центров стандартизации, метрологии и сертификации (ЦМС). Они созданы во всех крупных городах Беларуси, в том числе в шести областных городах и в некоторых районных центрах. БелГИМ является региональным метрологическим центром Госстандарта по г. Минску и Минской области.

Региональные метрологические центры Госстандарта выполняют следующие виды работ:

- проводят анализ состояния измерений и координацию работ по выполнению заданий отраслевых программ метрологического обеспечения;
- осуществляют хранение и поддержание на надлежащем уровне рабочих эталонов и СИ и передачу размера единиц величин от эталонов рабочим СИ;
- проводят государственный надзор за производством, состоянием, применением, ремонтом СИ и соблюдением метрологических правил, требований и норм, за состоянием и применением методик выполнения измерений, за работой метрологических служб, за измерениями радиоактивного загрязнения природной среды и всех видов сырья и продукции;
- осуществляют методическое руководство деятельностью метрологических служб субъектов хозяйствования;
- осуществляют метрологическую экспертизу проектов и образцов промышленной продукции;
- проводят государственные испытания, поверку, метрологическую аттестацию, калибровку СИ;
- выполняют особо точные измерения и осуществляют прокат СИ.

### 4.3 Основные виды деятельности по обеспечению единства измерений

Национальная система обеспечения единства измерений (СОЕИ) как организационная, научно-техническая и нормативно-правовая система предусматривает в рамках метрологического контроля мероприятия различного характера, направленных на обеспечение и поддержание необходимого уровня единства измерений. Рассмотрим некоторые виды метрологического контроля.

#### 4.3.1 Метрологическая аттестация СИ

Метрологическая аттестация средств измерений (МА СИ) представляет собой подробное исследование СИ с выдачей документа, который характеризу-

ет возможности его применения. В процессе МА СИ определяются метрологические характеристики СИ, в том числе подлежащие метрологическому контролю при эксплуатации, а также методики и периодичность их поверки (калибровки).

Общие требования к организации и порядку проведения метрологической аттестации СИ установлены в СТБ 8004-93 «Система обеспечения единства измерений. Метрологическая аттестация средств измерений. Основные положения».

Метрологическая аттестация распространяется на следующие СИ:

- СИ, которые не подлежат государственным испытаниям по СТБ 8001-93 «СОЕИ. Государственные испытания СИ. Основные положения. Организация и порядок проведения»;

- СИ, которые передаются в эксплуатацию в качестве опытных и экспериментальных образцов, изготовленных в процессе выполнения НИР и ОКР;

- экземпляры СИ, в том числе и серийного выпуска, для которых в силу неизменности и стабильности метрологических характеристик (МХ) возможно устанавливать индивидуальные значения;

- единичные экземпляры СИ серийного выпуска, применяемые в условиях и режимах, отличающихся от условий, для которых нормированы их МХ, а также если в конструкцию их внесены какие-либо изменения, которые могут повлиять на МХ;

- импортируемые в единичных экземплярах СИ, не относящиеся к области законодательной метрологии, или в обоснованных случаях с разрешения Госстандарта;

- измерительные системы, которые укомплектованы СИ, внесенными в Государственный реестр СИ Республики Беларусь, и используются в реальных условиях на месте эксплуатации.

МА СИ выполняют органы ГМС или подразделения МС субъекта хозяйствования с целью определения метрологических свойств этого СИ в оговоренном интервале изменения влияющих факторов и выдачи документа с указанием полученных данных.

МА СИ проводится в соответствии с «Программой и методикой МА». Этот методический документ устанавливает последовательность, объем и процедуру проведения МА.

Основными задачами МА являются:

- определение исследуемых МХ и их оценка;

- установление соответствия МХ требованиям технического задания (ТЗ) или технических условий (ТУ), или стандартов;

- установление номенклатуры МХ СИ, подлежащих контролю при поверке (калибровке), и опробование методики поверки (калибровки);

- установление межповерочных и межкалибровочных интервалов.

Все СИ, которые не должны проходить государственные испытания, допускаются к эксплуатации в соответствии со статьей 16 Закона Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» только после проведения МА.

Для СИ, метрологическую аттестацию которых проводят органы ГМС, решение о допуске их к эксплуатации (при положительных результатах МА) принимают руководители ГМС. В других случаях – руководитель предприятия, разработавшего, изготовившего или применяющего СИ по представлению МС, которая проводила метрологическую аттестацию.

Проведение МА предусматривает следующие этапы.

1 Рассмотрение представленной документации на СИ (ТЗ или ТУ, ТО и др.). Рассмотрение документации необходимо для решения технических и организационных вопросов проведения МА СИ.

К техническим вопросам относятся: выбор эталонного оборудования, помещения; обеспечения условий окружающей среды; метода проведения МА, наличия квалифицированного персонала и др.

К организационным вопросам относятся: установление порядка проведения МА, определение организации или структуры для проведения МА и др. На основании анализа документов и решения технических и организационных вопросов разрабатывается проект Программы и методики МА (ПМА) и проект методики поверки (калибровки).

2 Согласование и утверждение Программы и методики МА.

Проект ПМА в комплекте с другими документами предоставляется для согласования и утверждения организациям в зависимости от места проведения МА. Как правило, согласованию и утверждению предшествует проведение экспертизы проекта ПМА.

3 Проведение экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводятся в соответствии с ПМА.

4 Рассмотрение и оформление результатов МА.

При положительных результатах МА оформляется свидетельство о МА, которое подписывается исполнителем и руководителем организации, проводившей аттестацию.

При отрицательных результатах МА средство измерений бракуется и не допускается к эксплуатации.

#### 4.3.2 Аттестация методик выполнения измерений

*Методика выполнения измерений (МВИ)* – совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результата измерения с известной погрешностью или неопределенностью.

Сфера применения МВИ охватывает практически все виды деятельности. Документами, в которых устанавливаются определенные требования к продукции, процессам и услугам, условиям и методам измерений, являются МВИ.

Законодательством Республики Беларусь установлено, что измерения, результаты которых используются при оценке природных ресурсов, концентрации вредных и опасных веществ в продукции и окружающей среде, условий безопасности и охраны труда, безопасности продукции и услуг, при выполнении коммерческих расчетов, диагностики заболеваний и проведении лечения

человека, диагностики технического состояния особо опасных объектов и транспортных средств, при регистрации международных и национальных спортивных рекордов, проведении коммерческих операций по продаже определенного количества продукции и других, подлежат государственному метрологическому надзору и метрологическому контролю и должны выполняться по метрологически аттестованным и утвержденным методикам.

Основополагающим документом по применению МВИ в Республике Беларусь является межгосударственный стандарт ГОСТ 8.010-99 «Методика выполнения измерений. Основные положения». В нем установлены основные требования к разработке методики, аттестации и порядку ее проведения, стандартизации, а также метрологическому надзору и контролю.

Разработка, стандартизация и аттестация МВИ является в настоящее время одной из основных задач государственной и ведомственных МС в рамках МО измерений.

*Аттестация МВИ* – это исследование МВИ, осуществляемое в порядке, установленном Госстандартом, с целью подтверждения установленных приписанных характеристик погрешности измерений и определения ее соответствия предъявляемым метрологическим требованиям. Как вид деятельности, аттестация МВИ представляет собой процедуру установления и подтверждения соответствия МВИ предъявляемым к ней метрологическим требованиям.

Аттестация МВИ проводится после метрологической экспертизы (МЭ) документации, представляемой разработчиками МВИ, на основании теоретических или экспериментальных исследований этих методик.

В зависимости от поставленной цели различают два класса задач аттестации МВИ.

*Аттестация по минимуму* – исследования, направленные на определение априорной оценки погрешности измерений, которые могут и будут выполняться по данной МВИ (методом, средствами и по правилам, регламентированным этой МВИ), и выдача документа (аттестата, свидетельства) с указанием полученных результатов.

*Аттестация по максимуму* – исследования, направленные на определение таких режимов, условий и процедур выполнения измерений, которые обеспечивают минимальные погрешности измерений (при использовании регламентированных той же МВИ метода и технических средств) с априорной оценкой этих погрешностей, и выдача документа с указанием полученных результатов.

Аттестация по максимуму применяется, как правило, при аттестации МВИ, включающих сложные многоблочные измерительные комплексы и в случае предельно высоких требований к точности выполняемых измерений.

На практике применяют два метрологических приема аттестации МВИ: непосредственного сличения и расчетно-экспериментальный.

*Способ непосредственного сличения* используется в том случае, когда есть возможность провести параллельное (наряду с использованием аттестуемой МВИ) определение значений измеряемой величины с помощью образцовых методов и средств, которые обеспечивают точность, по крайней мере,

втрое превышающую точность метода и средств измерений, входящих в состав аттестуемой МВИ. При этом результаты измерений, полученные с помощью образцового метода и образцовых СИ, принимают за номинальные и относительно их оценивают результаты многократных измерений, выполняемых по аттестуемой МВИ. Варьируя условия и режимы работы, а также процедуры выполнения измерений по аттестуемой МВИ, возможно определить такие их комбинации, при которых погрешность измерений будет минимальной (аттестация по максимуму).

Расчетно-экспериментальный способ аттестации МВИ используют в случаях, когда нет образцовых методов и СИ необходимой точности или отсутствует техническая возможность для их применения. В основе этого способа положены: поэлементный анализ возможных причин, источников и факторов, обуславливающих погрешности; оценка составляющих погрешности; способ статистического суммирования отдельных частных погрешностей.

Процедура аттестации МВИ проводится в зависимости от области применения: если МВИ находятся в сфере государственного метрологического надзора и метрологического контроля, то аттестация и метрологическая экспертиза МВИ проводится органами ГМС; все типовые МВИ подвергаются аттестации и метрологической экспертизе только в органах ГМС; МВИ, используемые в области законодательной метрологии, утверждаются Госстандартом; индивидуальные МВИ могут проходить метрологическую экспертизу и аттестацию в ВМС или иными службами предприятий, аккредитованными на выполнение данной деятельности.

Результаты метрологической экспертизы оформляются в виде экспертного заключения. Результаты аттестации оформляют в виде протокола. В некоторых случаях при положительных результатах аттестации на МВИ выдается свидетельство об аттестации МВИ.

Документы по МВИ, предназначенные для применения в Вооруженных силах, подлежат метрологической экспертизе в специальном научном центре Министерства обороны.

Индивидуальные МВИ в большинстве случаев разрабатывают МС предприятий, где применяется данная МВИ. Они же выполняют аттестацию МВИ и осуществляют метрологический контроль (МК) за правильностью использования МВИ. Типовые МВИ контролируются государственными органами метрологического надзора (ГМН) и метрологического контроля (ГМК).

#### 4.3.3 Поверка средств измерений

Поверка является одной из важнейших процедур, которая обеспечивает единство и точность измерений в стране. Проводится государственной метрологической службой, метрологическими службами государственных органов управления (ведомств министерств) и субъектов хозяйствования (предприятий, организаций) как для эталонных, так и для всех рабочих СИ, для которых она является обязательной. Организация и порядок проведения поверок СИ регла-

ментируется стандартом СТБ 8003-93 «Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения».

*Поверка СИ* – это совокупность операций, выполняемых с целью подтверждения соответствия действительных значений метрологических характеристик СИ установленным обязательным требованиям по обеспечению единства измерений. Поверка проводится по определенной методике поверки, которая должна разрабатываться в соответствии с определенными нормативными документами. Соответствие или несоответствие СИ должно обязательно подтверждаться документально.

Поверку проводят лица, аттестованные в качестве поверителей в установленном Госстандартом порядке. Срок действия аттестата поверителей составляет пять лет.

Выполняются следующие виды поверок: первичная, периодическая, внеочередная, инспекционная, экспертная.

*Первичная* поверка проводится при выпуске СИ из производства или после ремонта, а также ввозимых по импорту СИ, прошедших государственные приемочные испытания по СТБ 8001-93 «Государственные испытания СИ». Первичной поверке подлежит, как правило, каждый экземпляр СИ, но допускается и выборочная поверка.

*Периодическая* поверка проводится через межповерочный интервал практически по такой же программе, как и первичная при эксплуатации и хранении СИ, с целью установления их пригодности к применению на последующий период между поверками. Для СИ, не подлежащих процедуре обязательной поверки, периодическая поверка может быть упрощена, если поверяемое СИ работает только в каком-то одном из нескольких диапазонов измерения или, если оно используется для измерения одной, а не нескольких ФВ, для которых оно рассчитано, если измерения проводятся в более узком диапазоне условий, чем предполагалось первоначально. В случае использования таких исключений в документации о поверке должна быть сделана специальная надпись, а на СИ должно быть нанесено условное обозначение.

*Внеочередная* поверка проводится до окончания срока действия периодической поверки (до окончания срока межповерочного интервала) в случае:

- если необходимо подтвердить годность СИ к применению;
- если мы вводим его в эксплуатацию после длительного срока хранения;
- при повреждении поверительного клейма, пломбы или утери документа, подтверждающего прохождение СИ периодической или первичной поверки;
- если СИ применяется в качестве комплектующего изделия и срок его хранения до включения не определен;
- если СИ отправляется потребителю по истечении половины межповерочного интервала.

*Инспекционная* поверка проводится при осуществлении государственного метрологического надзора или ведомственного метрологического контроля за состоянием и применением СИ в организации. Допускается сокращение про-

граммы инспекционной поверки по сравнению с перечисленными выше видами поверок.

*Экспертная* поверка проводится при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам, исправности СИ и возможности его применения. Ее проводят органы ГМС по письменному обращению заявителя (государственного арбитража, прокуратуры, суда, организации, граждан).

СИ, подлежащие поверке, делятся на две категории: СИ, подлежащие обязательной поверке, и СИ, подлежащие поверке по желанию владельца СИ.

*Обязательной* поверке подлежат СИ, применяемые в отраслях торговли, здравоохранения, защиты и безопасности государства, связи и других, которые имеют наиболее важное значение для обеспечения единства измерений, в целях защиты интересов и здоровья граждан, обеспечения безопасности страны и ее экономических интересов.

Перечень СИ, подлежащих обязательной поверке, приведен в приложении А к СТБ 8003-93 (с учетом изменения 1 за 1999 г.). Кроме указанных в приложении, обязательной поверке подлежат те СИ, которые применяются при проведении испытаний, метрологической аттестации и поверке средств измерений.

СИ, которые подлежат обязательной поверке, относятся к области действия законодательной метрологии и, соответственно, должны удовлетворять общим правилам, требованиям и нормам, которые требуют регламентации и контроля со стороны государства. Естественно, эти СИ входят в сферу деятельности органов государственного метрологического надзора и контроля. Межповерочные интервалы для них устанавливает государственная метрологическая служба.

СИ, не вошедшие в указанный выше перечень, могут подвергаться поверке в порядке, установленном владельцем СИ. Он же (владелец) устанавливает и правила метрологического контроля СИ.

Если СИ применяются в качестве индикаторов, то для них указывают только наличие определенной физической величины и не обязательно указывают ее значение. Эти СИ подлежат также метрологическому контролю предприятия (владельца средства). На индикаторы должно быть нанесено обозначение «И».

Поверку СИ, подлежащих обязательной поверке, проводят органы ГМС и аккредитованные поверочные лаборатории. Поверка собственных СИ может осуществляться метрологической службой непосредственно самого предприятия, но эта МС должна быть зарегистрирована в органах Госстандарта в установленном порядке.

Поверку СИ проводят:

- в стационарных поверочных лабораториях;
- в передвижных поверочных лабораториях;
- в специально оборудованных постоянных (или временно действующих) поверочных пунктах;
- на месте изготовления СИ;
- на месте эксплуатации СИ.

Место поверки устанавливает организация, проводящая поверку.

Расходы, связанные с поверкой, которую проводят органы ГМС, оплачивает владелец СИ по утвержденным тарифам. При проведении поверки СИ аккредитованной лаборатории плата за поверку осуществляется на договорной основе. Все расходы, связанные с вызовом поверителя, оплачивает владелец СИ, а проведение экспертной поверки оплачивается в тройном размере. Инспекционная поверка проводится бесплатно.

Важное значение имеет правильное установление межповерочного интервала (МПИ). Малая величина МПИ ведет к увеличению расходов, связанных с проведением поверок, большая величина МПИ – к росту убытков, обусловленных снижением точности СИ.

МПИ устанавливают в зависимости от изменения метрологических характеристик СИ, которые вызваны процессами старения и износа элементов СИ в процессе эксплуатации. Назначение МПИ осуществляют путем моделирования зависимости основных метрологических характеристик от времени. Для каждой из них определяют свой временной интервал, при превышении которого изменение МХ превысит допустимые пределы. В качестве МПИ выбирают наименьший из этих интервалов.

Первичное значение МПИ определяется разработчиком СИ и утверждается при проведении сертификации (государственных приемочных испытаниях типа СИ). В процессе эксплуатации оно корректируется организацией, осуществляющей поверку, с учетом результатов поверок. Более детально эти вопросы рассмотрены в метрологической рекомендации МИ 2187-92 «Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов».

Для эталонных СИ, принадлежащих ГМС и метрологическим службам юридических лиц, порядок установления и корректировки МПИ определен в межгосударственном стандарте ГОСТ 8.565-99 «Порядок установления и корректировки межповерочных интервалов эталонов». Результаты поверки оформляются протоколом по определенной форме.

Положительные результаты поверки СИ удостоверяются нанесением оттиска поверительного клейма на СИ и (или) на эксплуатационный документ. Выдается свидетельство о поверке по определенной форме. Владелец может запросить протокол поверки или выписку из протокола.

Если по результатам поверки СИ не удовлетворяет предъявленным к нему требованиям, то оно бракуется и выдается извещение о непригодности с перечислением причин. Если на СИ стоял оттиск поверительного клейма, он подлежит погашению, а свидетельство аннулируется.

По результатам инспекционной поверки составляется акт о проверке состояния СИ.

По результатам экспертной поверки составляется заключение, которое утверждается органами ГМС.

Формы документов, которые использует метрологическая служба предприятия при поверке собственных СИ, устанавливаются самим предприятием.



#### 4.3.4 Калибровка средств измерений

*Калибровка СИ* – это вид деятельности, направленный на обеспечение единства измерений в той области, на которую не распространяется действие государственного метрологического надзора и контроля. Организация калибровочных работ в стране проводится в рамках Национальной калибровочной службы (НКС). Она включает центральный орган НКС, органы по аккредитации калибровочных лабораторий и непосредственно калибровочные лаборатории, аккредитованные на право проведения калибровочных работ.

Общие требования к организации, порядку проведения и оформления результатов калибровки регламентированы в СТБ 8014-2000 «Калибровка СИ. Организация и порядок проведения».

*Калибровка СИ* – совокупность операций, которые служат для установления при определенных условиях соотношения между значениями величины, полученной с помощью данного СИ и соответствующими значениями величин, воспроизводимых эталоном.

Калибровка СИ проводится для определения действительных метрологических характеристик СИ.

Калибровка проводится для СИ, допущенных к применению на территории Республики Беларусь в соответствии с требованиями СТБ 8001 и СТБ 8004, в том числе для СИ:

- специального назначения, то есть используемых для специальной измерительной задачи в конкретных условиях;
- применяемых в ограниченном диапазоне измерений или функциональные возможности которых используются не в полном объеме;
- требующих определения МХ в реальных условиях применения СИ.

Калибровку СИ проводят аккредитованные калибровочные лаборатории. Она проводится лицами, прошедшими обучение и аттестованными в порядке, установленном Госстандартом.

Калибровка СИ проводится по типовым методикам калибровки, зарегистрированным БелГИМ, либо по методикам, утвержденным руководителем аккредитованной калибровочной лаборатории. Методики калибровки разрабатываются в соответствии с требованиями, изложенными в приложении к СТБ 8014.

Периодичность калибровки СИ устанавливается его владельцем с учетом рекомендаций аккредитованной калибровочной лаборатории.

Межкалибровочный интервал, то есть промежуток времени между двумя последовательными калибровками, устанавливается в графиках калибровки СИ.

Результаты калибровки позволяют определить:

- действительные значения измеряемой данным СИ величины;
- поправки к показаниям СИ;
- неопределенность измерения СИ.

*Неопределенность измерения* – это параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Из этого определения следует, что неопределенность является количественной мерой точности соответствующего результата измерения, и выражает степень доверия, с которой может значение измеренной величины в данных условиях измерения лежать внутри определенного интервала значений. Она дает ответ на вопрос, насколько достоверно полученный результат отражает значение измеряемой величины и делает возможным оценить надежность результата измерения, а также сравнить результаты различных измерений одинаковых измеряемых величин между собой или с эталонными значениями.

На практике оценивают стандартную, суммарную стандартную и расширенную неопределенности. В свою очередь, в зависимости от имеющейся информации о измеряемой величине способы оценки стандартных неопределенностей подразделяются: на оценку неопределенности по типу *A* и оценку неопределенности по типу *B*.

*Стандартная неопределенность* – неопределенность результата измерения, выраженная как стандартное отклонение.

*Суммарная стандартная неопределенность* – стандартная неопределенность результата измерения, когда результат получают из значений ряда других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерения изменяется в зависимости от изменения этих величин.

*Оценка неопределенности по типу A* – метод оценивания неопределенности путем статистического анализа ряда наблюдений.

*Оценка неопределенности по типу B* – метод оценивания неопределенности иным способом, чем статистический анализ ряда наблюдений.

*Расширенная неопределенность* – величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеряемой величине.

*Коэффициент охвата* – числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности.

Весь процесс оценивания и выражения неопределенности результата измерения можно представить в виде следующих этапов:

- описание измерения и составление его модели;
- оценивание значений и стандартных отклонений входных величин;
- анализ корреляции;
- составление бюджета неопределенности;
- расчет результата измерения;
- расчет суммарной стандартной неопределенности;
- расчет расширенной неопределенности;
- предоставление конечного результата измерения.

Порядок проведения калибровки включает следующие основные этапы:

– рассмотрение заявки с целью определения технических возможностей проведения калибровки в соответствии с требованиями заказчика (форма заявки приведена в приложении Б к СТБ 8014);

– разработку и согласование (при необходимости) методики калибровки с заказчиком;

– проведение калибровки;

– оформление результатов калибровки.

Положительные результаты калибровки должны оформляться нанесением калибровочной этикетки или оттиска калибровочного клейма на СИ и (или) эксплуатационные документы с выдачей свидетельства о калибровке.

По отрицательным результатам калибровки (при несоответствии полученных результатов калибровки заявленным владельцем требованиям) выдается протокол или выписка из протокола, в котором указываются причины несоответствия.

#### 4.3.5 Утверждение типа СИ

*Утверждению типа СИ* – это один из видов метрологического контроля, в результате проведения которого средством измерений, предназначенному для применения в сфере законодательной метрологии, присваивают соответствующее буквенно-цифровое обозначение.

При этом виде метрологического контроля указанные СИ, в обязательном порядке проходят государственные испытания в соответствии с СТБ 8001, в ходе которых устанавливаются их метрологические и технические характеристики и определяется соответствие их требованиям законодательства Республики Беларусь в области обеспечения единства измерений.

Результаты государственных испытаний СИ являются основанием для присвоения и утверждения типа средствам измерений. Решение принимается Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь и удостоверяется сертификатом об утверждении типа СИ. Сведения о СИ, в отношении которых принято это решение, вносятся в «Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь» (Госреестр).

Госреестр ведется с 1993 года и содержит информацию о типах СИ и государственных стандартных образцах (ГСО), допущенных к применению на территории Республики Беларусь.

Госреестр ведется в следующих целях:

– обеспечения государственного учета утвержденных типов СИ;

– информационного обеспечения государственных органов, юридических лиц и индивидуальных предпринимателей о типах (модификациях, исполнениях) СИ и ГСО, включенных в Госреестр;

– создания централизованной информационно-поисковой базы данных типовых СИ.

Внесение типов СИ и ГСО в Госреестр осуществляется в установленном порядке Председателем Госстандарта по рекомендации научно-технической

комиссии по метрологии Госстандарта. Каждому утвержденному типу СИ и ГСО присваивается регистрационный номер Госреестра.



На утвержденный тип СИ и ГСО выдается сертификат установленного образца, а на само СИ и ГСО (и в их эксплуатационные документы) наносится знак утверждения типа средств измерений, изображение которого представлено на рисунке слева.

#### 4.4 Общие сведения об эталонах и поверочных схемах

Основные определения, касающиеся эталонов, приведены в СТБ 8002-93 «Эталоны единиц физических величин».

Эталонная база является основой Государственной метрологической службы, без которой невозможно создавать, хранить и передавать единицы физических величин, а следовательно, невозможно обеспечить единство и точность измерений.

*Эталоны единицы величины* – это СИ или комплекс СИ, которые предназначены для определения, воспроизведения и (или) хранения этой единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ. Они утверждаются в качестве эталона в установленном порядке.

Различают следующие виды эталонов: первичные и межгосударственные эталоны; национальные эталоны; исходные эталоны (вторичные).

*Первичный эталон* – это эталон, который признан на международном уровне и служит для согласования с ним размеров единиц, которые воспроизводит и хранит национальный эталон.

*Национальный эталон* – это эталон, признанный уполномоченным на то государственным органом служить основой для установления значений всех других эталонов единицы данной величины.

*Исходный эталон* – это:

- эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами из имеющихся в республике эталонов, в случае отсутствия национального эталона;
- лучший по метрологическим свойствам из имеющихся в данной иерархической структуре (например, в ведомственной МС, в головной организации и т. п.).

В состав национальных эталонов включаются СИ, при помощи которых воспроизводят и хранят единицу, осуществляют передачу размера единиц и контролируют условия измерения и неизменность размера хранимой единицы. Можно утверждать, что любой национальный эталон является комплексным СИ.

Исходные эталоны делятся на *эталон для хранения* и *эталон для передачи единицы*. Их создают с целью защиты национальных эталонов от повреждения, а также для обеспечения единства в той области измерений, где в качестве первичного используется международный эталон. В состав этого эталона входит комплекс средств, при помощи которых осуществляется хранение

единицы и передача ее размера нижестоящим СИ, а также СИ, которые контролируют условия измерений и неизменность размера хранимой единицы.

Каждая из операций, которая выполняется эталоном, имеет строгое определение.

*Воспроизведение единицы* – это совокупность операций по материализации единицы ФВ с наивысшей в стране точностью (обеспечивается с помощью национального или первичного эталона).

*Передача размера единицы* – это приведение размера единицы величины, которая хранится поверяемым СИ, к размеру единицы, которая воспроизводится и (или) хранится вышестоящими эталонами (операция передачи осуществляется при поверках или сличениях поверяемого средства).

*Сличение с эталоном* – это совокупность операций, с помощью которых устанавливается соотношение между значением величины, которую получают с помощью данного поверяемого СИ, и известным значением величины, которое получают с помощью вышестоящих эталонов.

*Хранение единицы* – это совокупность операций, необходимых для обеспечения неизменности во времени размера единицы, присущих данному СИ.

*Хранение эталона* – это совокупность операций, необходимых для обеспечения неизменности во времени всех метрологических характеристик данного СИ.

*Ученый хранитель эталона* – это специальная категория должностных лиц из числа ведущих специалистов-метрологов, которая осуществляет работы по хранению эталонов.

*Поверочные схемы* (ПС) представляют собой утвержденные в установленном порядке документы, которые регламентируют средства, методы и точность передачи размера единицы величины от государственного эталона (национальный, первичный, исходный) к рабочим эталонам и рабочим СИ. В настоящее время эти документы составляются на основании ГОСТ 8.061-80 «Поверочные схемы, содержание и построение».

В зависимости от области распространения поверочные схемы подразделяются на государственные ПС, ведомственные ПС и локальные ПС.

*Государственная поверочная схема* распространяется на все виды СИ, применяемые в стране. Государственные поверочные схемы определяют передачу размера от эталонов наивысшей точности (первичных, национальных) ко вторичным эталонам (рабочим эталонам), которые, в свою очередь, являются исходными эталонами для ведомственных метрологических служб. Эти схемы разрабатывает Госстандарт, он же утверждает их. Государственные поверочные схемы документируются в виде государственных стандартов.

*Ведомственные поверочные схемы* распространяются на все СИ, подлежащие поверке в данном ведомстве. Поверочные схемы разрабатывает ведомственная метрологическая служба, они оформляются в виде отраслевого стандарта, согласовываются с региональным органом или непосредственно с Госстандартом. Ведомственная поверочная схема определяет передачу размера от

исходного эталона, принадлежащего ведомству, к рабочему эталону, который применяется на предприятии.

*Локальные поверочные схемы* распространяются на СИ, подлежащие поверке, как правило, в метрологической службе предприятия. Эти схемы определяются тем, какой рабочий эталон имеется на предприятии, какова точность рабочих СИ и т. д. Локальные поверочные схемы разрабатываются метрологическими службами предприятий, они обычно документируются в виде стандарта предприятия и действуют только на нем. При этом локальная поверочная схема должна быть согласована с вышестоящей метрологической службой (ведомство, министерство и другой государственный орган управления).

Методы передачи размера (поверки), указанные в поверочной схеме, должны соответствовать одному из общих методов:

- непосредственное сличение (т. е. без применения средств сравнения);
- сличение при помощи компаратора или других средств сравнения;
- метод прямых измерений;
- метод косвенных измерений.

В зависимости от условий, при которых происходит передача размера, поверочные схемы делятся на два класса: централизованные и децентрализованные.

*Централизованная поверочная схема* предполагает, что все нижеследующие эталоны, которым передается размер, должны быть привезены в центр, где хранятся эталоны высшей точности.

*Децентрализованная поверочная схема* применяется в тех случаях, когда необходимо привезти эталонные СИ в места концентрации рабочих СИ или когда рабочее СИ нельзя привезти к эталону. Для применения децентрализованной поверочной схемы необходимо разрабатывать специальные эталоны, которые называются установками высшей точности.

## 5. Планирование измерительного эксперимента

### 5.1 Основные понятия, термины и определения

Процесс измерения какой-либо физической величины заключается по сути в сравнении измеряемой величины с некоторым ее значением, принятым за единицу. В общем случае измерение определяется как получение информации об объекте измерения. Но само по себе получение такой информации можно рассматривать с разных сторон, характеризующих условия и полноту получения конечного результата.

С одной стороны, измерения проводятся для того, чтобы что-то узнать об объекте измерений, т. е. об измеряемой величине. Для этого экспериментатор *проводит обзор информации*. Результат измерения должен описывать изучаемое состояние или явление с помощью соотношения, называемого матема-

тической моделью. Однако сбор информации является необходимым, но недостаточным условием измерения.

С другой стороны, измерение дает сведения только о том, что необходимо измерить (например, об измеряемой величине, величинах), но не содержит сведений ни об одном из многих других состояний или свойств объекта. Следовательно, измерение должно быть *избирательным*.

Более того, любой из экспериментаторов должен получить в результате измерения одну и ту же информацию об объекте и придти к одним и тем же выводам. Следовательно, измерение должно быть *объективным*, т. е. не должно зависеть от экспериментатора.

Кроме того, в результате измерения можно получить два типа информации: так называемую *структурную информацию* (это информация о состоянии, структуре и природе определенной, выбранной характеристики) и *метрическую информацию* (информацию о величине исследуемой характеристики). Структурную информацию получают в результате *качественного* измерения, а метрическую – в результате *количественного* измерения.

Качественное измерение проводится для определения природы характеристики, которая должна быть измерена, и только после этого можно проводить количественные измерения величины этой характеристики. Качественное измерение обеспечивает экспериментатора информацией, которая необходима ему для того, чтобы правильно выбрать соответствующие средства и методы измерений для количественного измерения величины исследуемой характеристики.

Таким образом, измерение является связующим звеном между реальным миром и представлением о нем в фундаментальных и прикладных науках.

*Измерение* определяют как совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, которые обеспечивают нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

С понятием измерение неразрывно связаны такие понятия как *методика измерения* и *метод измерений*, которые были подробно рассмотрены в предыдущих разделах.

*Эксперимент* – это система операций, воздействий или наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях.

*Опыт* – это воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях проведения эксперимента при возможности регистрации его результата.

*План эксперимента* – это совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опыта.

Для проведения измерений необходимо выполнение следующих условий:

- подлежащая измерению физическая величина должна быть однозначно определена;
- единицы измерений должны быть установлены соглашением или законом;
- должно выполняться требование обеспечения *единства измерений*.

Принципиальным отличием измерений физических величин от нефизических является обязательное применение средств измерений и указание кроме результата измерения погрешности.

В общем случае для получения результата измерения требуется не одна, а несколько известных величин, так называемая *шкала величин*.

Результат измерения может быть выражен в форме именованного числа, ряда чисел или в виде аналитической зависимости.

Качество результата измерения характеризуется его точностью и погрешностью.

Близость друг к другу результатов измерений одной и той же физической величины, выполненных одними и теми же средствами измерений, одним и тем же методом измерений в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью, отражает *сходимость результатов измерения*. Расхождение результатов таких измерений определяет случайную составляющую погрешности результата измерения. Требуемую точность для всего многообразия измерений обеспечивают за счет системы передачи единиц физических величин (поверки, калибровки, метрологической аттестации, метрологической экспертизы), применения методов измерений, уменьшающих погрешность, разработки новых средств измерений и т. д.

*Воспроизводимость результатов измерений* – это близость результатов измерений одной и той же физической величины, полученных в разных местах, различными средствами измерений, методами, операторами в разное время, но проведенных в одних и тех же условиях измерений (температура, влажность, давление). Воспроизводимость характеризуется среднеквадратическим отклонением сравниваемых рядов измерений.

*Структура измерения* включает в себя следующие основные элементы:

- априорная информация об измеряемой физической величине и объекте измерения, позволяющая сформулировать цель измерения;
- модель объекта измерения, в состав которой входят модель измеряемой величины и сама измеряемая величина;
- объект измерения, в частности, физическая величина, подлежащая измерению;
- средство измерения, на которое воздействует входной сигнал и на выходе которого получается отклик;
- модель средства измерения с его метрологическими характеристиками;
- метод измерения, являющийся связующим звеном между объектом (физической величиной) и средством измерения;
- условия измерения, влияющие на объект измерения и средство измерения, а в результате и на отклик;
- оператор (экспериментатор), проводящий измерения и воздействующий на средство измерения. Условие объективности измерения требует, чтобы воздействие оператора на результат измерения сводилось к минимуму;
- результаты наблюдений;
- модель результата наблюдения;



- алгоритм обработки данных, строящийся на основании априорной информации об объекте измерения и выбранных моделях;
- обработка полученных в результате наблюдений данных, включающая вычислительное средство и оценку результата измерения и погрешностей;
- анализ результатов наблюдений на основании априорной информации об объекте измерений и полученных экспериментальных результатах.

*Априорная информация* определяет достижимую точность измерений и их эффективность и представляет совокупность сведений о возможных значениях измеряемой величины или об ее свойствах.

*Объект измерения* – это тело (физическая система, процесс, явление и т. д.), которое характеризуется одной или несколькими физическими величинами. Он обладает многими свойствами и находится в различных связях с другими объектами. Для исследований объекта измерений или его отдельных свойств и особенностей создаются *модели объекта* измерений.

*Модель объекта измерений* – это теоретико-физическая и математическая конструкция, которая отражает свойства объекта, существенные для данной измерительной задачи. Модель строится в соответствии с целью измерения до его выполнения на основе априорной информации об объекте измерения и условиях проведения измерения.

На основании модели в объекте измерения выделяют измеряемые физические величины. Непосредственно наблюдаемой физической величиной является измерительный сигнал, который связан с измеряемыми физическими величинами объекта. Физическая величина в данном случае представляет собой определенный параметр модели объекта измерения, количественную оценку которого необходимо получить в результате измерения.

*Модель средства измерения* представляется совокупностью его метрологических характеристик, т. е. характеристик тех свойств, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений.

Выбранный метод измерения обусловлен целью измерения и определяет организацию взаимодействия средства измерений с объектом измерений, а также способ получения результата измерений из исходных и опытных данных. Следовательно, алгоритм обработки результатов наблюдений можно рассматривать как часть метода измерений.

*Условия измерений* определяют состояние объекта измерений и качество использования средств измерений. Они влияют на измеряемую величину и свойства средств измерений.

*Модель результата измерения (уравнение измерения)* – это формализованное описание измерения. Она выражает связь между исходными и опытными данными, с одной стороны, и результатами измерения – с другой.

Исходя из вышесказанного, измерения можно рассматривать как систему, состоящую из параллельных рядов элементов. Первый ряд относится к реальным объектам (реальный ряд), куда можно отнести объект измерения, физическую величину, метод и средство измерений, входной сигнал, выходной сигнал (отклик), вычислительные средства. Второй ряд относится к моделям (мо-

дельный ряд) и включает в себя: цель измерения; модели объекта измерения, измеряемой физической величины, средства измерений, результатов наблюдений; данные о влияющих величинах и помехах; алгоритм обработки результатов наблюдений.

Соответствие (адекватность) реального и модельного рядов устанавливают по результатам измерительного эксперимента при оценке погрешностей измерения. При условии адекватности моделей алгоритмы получения результата измерения в обоих рядах одинаковы (тождественны). Превышение оценки погрешности после проведения измерения указывает на неадекватность модели измерения. Связующим звеном между модельным и реальным рядами измерения являются математическая обработка данных и полученная разница между ними, которая характеризует несовершенство измерений. Источниками погрешностей будут неполнота и неадекватность модели измерений.

## 5.2 Основные этапы измерительного эксперимента

Сущность процесса измерительного эксперимента и его цель выражает основное уравнение измерений.

*Цель измерения* – это совокупность требований к измерению, вызванных содержанием деятельности, в рамках которой проводят измерения. Цель измерения конкретизирует объект измерения, выделяет в нем интересующую экспериментатора физическую величину и определяет требуемую точность измерения.

Измерение как процесс можно разделить на четыре основных этапа. Эти этапы различаются по виду операций и трудоемкости. Для каждого конкретного измерения (измерительного эксперимента) объем, значимость и соотношение этапов между собой могут изменяться. Порядок выполнения операций регламентируется действующим нормативным документом.

*Первый этап.* Постановка измерительной задачи и построение математической модели объекта измерения.

Он включает:

- постановку цели, для которой необходим анализ априорной информации;
- формирование модели объекта измерения;
- определение измеряемой физической величины (нескольких физических величин);
- формирование основных уравнений измерений, при этом параметры модели должны соответствовать свойствам объекта измерений;
- оценки предполагаемой погрешности результата измерения и формы ее представления.

При постановке измерительной задачи следует выбрать модель, измеряемые параметры которой соответствуют свойствам объекта измерения, информацию о которых следует получить в результате измерения, оценить предполагаемую точность результата измерения и формы его представления.

При проведении анализа правильности постановки измерительной задачи необходимо уточнить принятую модель объекта измерения (процесса, являе-

ния) и проверить ее соответствие объекту измерения; оценить, удовлетворяет ли предполагаемая точность результата измерений и форма его представления цели измерительной задачи.

В модели объекта измерения необходимо уточнить величины, которые подлежат измерению, и проверить их на соответствие объекту измерения. Модель объекта измерения должна удовлетворять следующим требованиям:

- погрешность, обусловленная несоответствием модели и реального объекта, не должна превышать 10 % от предела допускаемой погрешности результата измерений;

- составляющая погрешности результата измерений, обусловленная нестабильностью измеряемых физических величин в течение времени, необходимого для проведения измерения, также не должна превышать 10 % от предела допускаемой погрешности результата измерений.

Если выбранная модель не удовлетворяет данным требованиям, то необходимо перейти к другой модели объекта измерения или по-другому спланировать измерительный процесс.

*Второй этап.* Составление плана измерений.

Этот этап включает:

- выбор метода измерения;
- выбор средства измерения;
- предварительный выбор алгоритма обработки данных;
- априорная оценка погрешности результата измерения;
- выбор параметров измерительного эксперимента.

В зависимости от требований измерительной задачи измерения могут выполняться как в нормальных, так и в рабочих условиях.

*Нормальные условия* – это условия измерений, характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений можно пренебречь вследствие малости. Нормальные условия измерений регламентируются стандартом.

Чтобы обеспечить измерения в нормальных условиях, необходимо выделить рабочее пространство, действием влияющих величин внутри которого можно пренебречь.

Если действием внешних влияющих величин внутри рабочего пространства пренебречь невозможно, следует их фиксировать с целью расчета и последующего введения соответствующих поправок или с целью расчета дополнительных погрешностей средств измерений. Погрешность средств измерений, применяемых для контроля внешних условий, должна составлять не более 25 % от изменения влияющей величины.

Если необходимо сопоставить результаты измерений, проводимых в различных условиях, то в расчетах необходимо их привести к одинаковым условиям, как правило, нормальным.

Метод и средства измерений должны обеспечить выполнение измерительной задачи (нахождения значения физической величины и оценку погрешности ее измерения) в заданных условиях измерений.

При выборе средства измерений следует учитывать принцип его действия, способы применения, технические и метрологические характеристики, устойчивость к внешним воздействиям.

Метод измерения должен по возможности обеспечивать минимальную погрешность и способствовать минимизации систематических погрешностей или переводу их в разряд случайных.

При выборе метода и средства измерений руководствуются соответствующими нормативно-техническими документами, в частности, МИ 1967 «Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений».

Выбрав метод и средство измерений, необходимо предварительно оценить погрешность измерения  $\Delta$ , которая включает: погрешность предполагаемых метода и средства измерений; погрешность экспериментатора; погрешности, обусловленные внешними воздействиями (условия проведения эксперимента) и сравнить ее с допустимой погрешностью  $\Delta_d$ , заданной в условиях измерительной задачи.

Если  $\Delta > \Delta_d$ , то необходимо уточнить правильность выбранного метода измерений, условий проведения измерений или выбрать средство измерений с лучшими метрологическими характеристиками, или выбрать другой метод измерений (если это возможно).

Если  $\Delta \leq \Delta_d$ , то выбранные метод и средство измерений обеспечивают получение результата с требуемой точностью.

Для выполнения однократных (рабочих) измерений следует выбирать средства измерений с возможно меньшей случайной составляющей их погрешности.

Требования к погрешности результата измерений должны соответствовать цели измерительной задачи. Эту погрешность целесообразно оценить предварительно с учетом всех ее предполагаемых источников. Если предварительная оценка погрешности результата измерений не соответствует требованиям точности измерительной задачи, следует провести анализ предполагаемых источников погрешности и предпринять меры по их уменьшению (например, выбрать более точное средство измерений, изменить метод измерений, поручить измерения более квалифицированному экспериментатору, уточнить условия проведения измерений, уточнить влияющие величины, предпринять меры по уменьшению воздействия влияющих величин и т. д.).

Число наблюдений  $n$  при измерении зависит как от требований к точности измерений, так и от реальной возможности повторения этих измерений. Оно определяется значимостью случайных погрешностей по сравнению с пределом допускаемой погрешности результата измерения.

*Уровень значимости* – это вероятность ошибки первого рода, т. е. когда отвергается верная гипотеза из-за ошибки принятия решения при анализе опытных данных. Требования к числу измерений  $n$  определяют из выражения

$$n \geq \frac{t^2(q, n) \cdot \sigma^2}{\Delta_d^2}, \quad (5.1)$$

где  $t(q, n)$  – квантильное распределение;  $q$  – уровень значимости;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение группы результатов измерений.

Число измерений увеличивают при наличии существенных систематических погрешностей с целью их перевода в разряд случайных погрешностей. При наличии и неисключенных систематических и случайных погрешностей  $n$  будет определяться соотношением между ними, а также требованием к точности результата измерения.

Экспериментатор должен изучить методику и последовательность выполнения измерений, убедиться перед измерением, что основные и вспомогательные средства измерений имеют действующие свидетельства о поверке (поверительные клейма) или свидетельства о метрологической аттестации. При проведении измерения с помощью автоматизированных средств измерений необходимо протестировать измерительную систему и сопоставить полученный результат с ожидаемым.

Чтобы уменьшить субъективную составляющую погрешности, наиболее ответственные и высокоточные измерения допускается проводить несколькими операторами, а результаты измерений усреднять. Исключить или, по крайней мере, уменьшить возможность появления подобных погрешностей позволяет автоматизация процесса измерений.

Погрешность округления  $\Delta_0$  не должна влиять на последнюю значащую цифру погрешности окончательного результата измерения. Она не должна превышать 10 % от предела допускаемой погрешности результата измерения:

$$\Delta_0 \leq 0,1\Delta_d. \quad (5.2)$$

Если данное условие не выполняется, то число отсчетов необходимо увеличить настолько, чтобы погрешность округления удовлетворяла неравенству (5.2), либо (если это возможно) изменить требования к допустимой погрешности, либо учитывать эту составляющую.

*Третий этап.* Измерительный эксперимент (выполнение экспериментальных операций и получение экспериментальных данных).

Он содержит следующие элементы:

- взаимодействие средства измерений с объектом измерения;
- преобразование сигнала измерительной информации;
- воспроизведение сигнала заданного размера;
- сравнение сигналов на выходе средства измерений (откликов) и регистрация результата.

*Четвертый этап.* Обработка экспериментальных данных.

Этот этап включает:

- анализ экспериментальных данных и выбор алгоритма обработки;
- вычисление результата измерений и показателей его погрешности;
- анализ и интерпретацию полученных результатов в рамках сформулированной цели измерений.

Если при анализе процесса измерений удалось установить источник появления промахов, то их исключают перед обработкой результатов измерений. Если причины промахов неизвестны, то для установления того, является это промахом или нет и можно ли исключить выявленные промахи, используют различные известные критерии обнаружения грубых погрешностей (промахов).

Обнаруженные и вычисленные систематические погрешности измерения учитывают в результатах измерений в виде поправок или поправочных множителей, таким образом исключая их, а неисключенные систематические и случайные погрешности суммируются для определения погрешности результата измерения.

Результаты измерений в зависимости от цели измерительной задачи могут быть представлены числом, в виде таблицы, графика или в другом виде.

Формы представления результатов измерений и их погрешностей должны соответствовать установленным в нормативных документах (рассмотрены в предыдущих разделах).

Погрешность результата измерений, как правило, выражают одной значащей цифрой. Две значащие цифры сохраняют в случаях:

- при высокоточных измерениях;
- если первая значащая цифра не более трех;
- если предел допускаемой погрешности задан двумя значащими цифрами.

### 5.3 Планирование измерительного эксперимента

В ходе планирования измерений перед экспериментатором стоит задача выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для описания поведения исследуемого объекта измерений с требуемой точностью.

Измерения всегда базируются на априорной информации. На основе априорных данных строят или выбирают физическую или математическую модель объекта измерения. Это важный этап, так как ошибки, допущенные на этом этапе, в дальнейшем невозможно исправить. В ходе измерения модель объекта измерения можно лишь уточнить, например путем анализа предварительно проведенных измерений. Несоответствие реального объекта приписываемой ему модели служит источником методической погрешности.

Одной из основных задач планирования измерений является поиск и идентификация взаимосвязей между входными и выходными параметрами объекта и представления их в количественной форме в виде математической модели.

Сложность объекта измерения определяется количеством его различных возможных состояний. На практике достаточно выделить конечное число наиболее существенных параметров, интересующих экспериментатора в данной измерительной задаче, значения которых будут с заданной точностью определять состояние объекта измерения.

В общем случае объект измерения представляет собой систему, на которую воздействуют входные параметры  $X_k$ , внешние воздействия  $\omega_p$ , а в резуль-

тате получается реакция системы в виде выходных параметров  $Y_n$ , по которым судят об измеряемой величине (рисунок 5.1).

Величины  $X_1, X_2, \dots, X_k$  характеризуют внешнее воздействие на объект измерения и носят название *факторов*.

*Фактор* – это переменная величина, по предположению влияющая на ход эксперимента.

Факторы являются входными величинами для объекта измерения и могут быть измерены. Фиксированное значение фактора относительно начала отсчета носит название *уровня фактора*. *Основным уровнем фактора* будет натуральное значение фактора, соответствующее нулю в безразмерной шкале.

Величины  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  характеризуют реакцию системы и носят название *откликов*.

*Отклик* – это наблюдаемая случайная переменная, по предположению зависящая от факторов.

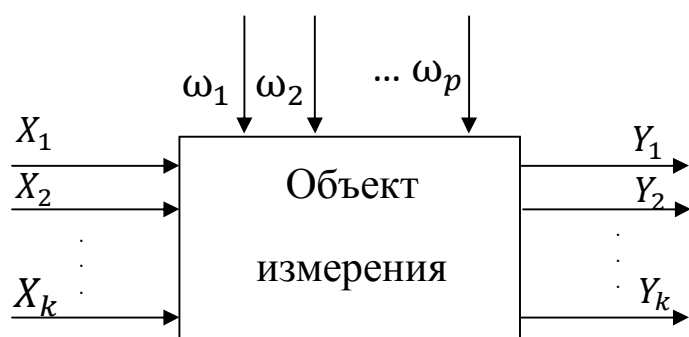


Рисунок 5.1 – Структурная схема объекта измерения

Зависимость математического ожидания отклика от факторов носит название *функции отклика*, а зависимость, получаемая при подстановке в функцию отклика значений ее параметров – *оценки функции отклика*. От значений откликов, которые и являются результатами измерений, зависит возможность и интенсивность использования исследуемых посредством измерений свойств объекта измерений.

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p$  – возмущающие воздействия, которые носят случайный характер и случайным образом влияют на величину отклика, и не зависят от факторов.

Такое представление реального объекта измерения является упрощенным, следовательно его можно назвать моделью. И хотя свойства исследуемого объекта известны далеко не полностью, для оптимального управления таким объектом вполне достаточно модели.

Для построения модели объекта измерения необходимо определить, какие параметры объекта следует принять в качестве факторов, откликов и возмущающих воздействий, и выявить зависимости между ними. На основании этого можно составить конкретный план эксперимента.

Все эксперименты можно классифицировать на активные и пассивные.

При *пассивном эксперименте* экспериментатор не имеет возможности воздействовать на объект измерения, поэтому задача определения наилучшего плана эксперимента сводится к оптимальной организации пассивного сбора информации. Он включает в себя выбор интервалов времени между моментами измерения, задание числа выполняемых измерений, определение количества

точек в диапазоне измерения, определение методов обработки результатов измерения и т. д. При этом экспериментатор никак не влияет на значение факторов, откликов и внешних воздействий и использует известные методы обработки результатов. Недостатком пассивного эксперимента является необходимость проведения большого количества опытов.

*Активный эксперимент* связан с воздействием экспериментатора на ход процессов в исследуемом объекте и возможностью выбора в каждом опыте тех уровней факторов, которые представляют для него наибольший интерес. Активные эксперименты позволяют значительно уменьшить количество опытов, однако их проведение не всегда возможно по техническим или экономическим причинам. Основным недостатком активного эксперимента заключается в том, что если какой-либо существенный фактор окажется неучтенным, то это может привести к значительному увеличению погрешности при эксперименте.

С другой стороны, увеличение числа рассматриваемых факторов приводит к значительному возрастанию числа опытов, что сводит на нет преимущества активного эксперимента. Поэтому на практике следует использовать методы отсеивания несущественных факторов.

В соответствии с вышесказанным, процесс планирования эксперимента заключается в оптимизации числа опытов при заданном числе факторов и внешних воздействий.

Началом планирования эксперимента в большинстве случаев является выбор параметров объекта, используемых в качестве факторов, откликов и внешних воздействий. Простейшим случаем является однофакторное планирование, при котором предполагается изменение только одного выбранного фактора.

При планировании многофакторного эксперимента необходимо учитывать влияние многих независимых переменных, т. е. предполагать изменение всех факторов сразу. Это планирование более эффективно, так как позволяет значительно уменьшить погрешности результатов измерения.

Построение плана эксперимента сводится к выбору симметричных относительно основного уровня экспериментальных точек. При этом для каждого фактора выбирают два крайних уровня, между которыми они будут варьироваться в ходе эксперимента.

Обозначим через  $X_{j0}$  основной уровень фактора  $X_j$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ). Величина фактора  $X_j$  будет варьироваться от  $X_{jn}$  до  $X_{jв}$ . Уровень  $j$ -фактора, соответствующего большему значению ( $X_{jв}$ ), называют *верхним*, а нижнему ( $X_{jn}$ ) – *нижним*. Разность между максимальным и минимальным натуральными значениями факторов в данном плане эксперимента называется *размахом варьирования*. Половина размаха называется *интервалом варьирования факторов*.

В некоторых случаях бывает удобно перевести факторы в разряд безразмерных кодированных факторов:

$$\bar{X}_j = \frac{X_j - X_{j0}}{\lambda_j}, \quad (5.3)$$



где  $\bar{X}_j$  – кодированное значение  $j$ -фактора;  $X_j$  – натуральное значение  $j$ -фактора;  $X_{j0}$  – натуральное значение нулевого уровня  $j$ -фактора;  $\lambda_j$  – интервал варьирования. На практике стремятся выбирать уровни варьирования так, чтобы  $X_j = \pm 1$ .

После выделения параметров и характеристик объекта измерения выбирают виды их измерений в зависимости от возможности реализации, а также от требуемой точности получаемых результатов измерений.

Далее необходимо учесть влияние объекта измерения и средства измерений друг на друга.

Закономерность измерений можно выявить, получив уравнение измерений в аналитическом виде с использованием математических моделей тех компонентов, которые участвуют в процессе измерения и оказывают влияние на результат измерения (факторы, отклики) и проанализировав его.

*Математической моделью эксперимента* называется зависимость между факторами и откликами, выраженная в виде математических формул.

Рациональный выбор того или иного аналитического выражения для искомой модели может быть обоснован лишь при учете определенного перечня требований.

Первое требование к математической модели – это удобство ее последующего использования, что требует *компактности* модели. Компактность модели достигается удачным выбором элементарных функций, обеспечивающих хорошее приближение к реальности при малом числе.

Второе требование – это содержательность или *интерпретируемость* модели. Выполнение этого требования желательно, но необязательно и достигается путем придания определенного смысла контактам или функциям, входящим в найденную математическую модель.

В заключение необходимо отметить, что независимо от цели измерительного эксперимента его планирование необходимо осуществлять с учетом набора комбинаций уровней всех факторов, воздействующих на измеряемую величину и участвующих в формировании результата измерения. Результатирующими показателями этой работы должны быть пригодность, точность и экономическая эффективность разработанного плана.

## 6 Тенденции развития и применения измерительной техники

### 6.1 Основные направления развития и совершенствования измерений и средств измерений

Развитие новых направлений науки и техники, бурный рост радиоэлектронной промышленности, повсеместное внедрение компьютеров и информационных технологий, автоматизация производства и сферы потребления невоз-

можно без совершенствования измерительной техники и повышения эффективности ее метрологического обеспечения, создания новых методов измерений и средств контроля. На всех этапах исследования, разработки, производства и эксплуатации устройств и систем работа инженера связана с большим числом измерений различных величин. От того, насколько правильно и быстро проводятся измерения, зависят сроки разработки, качественные показатели и надежность аппаратуры, а также затраты на ее создание и использование. В этой связи для метрологии характерны:

- повышение точности измерений и расширение пределов измеряемых величин;

- разработка новых методов измерений и средств измерений с использованием новейших физических принципов действия и технологий, необходимых для перспективных направлений науки и технологии;

- создание и внедрение автоматизированных средств измерений, характеризующихся высокой точностью, быстродействием и надежностью.

Следует обратить внимание на то, что на современном этапе научно-технического развития в метрологии, и, в частности, в измерительной технике происходят значительные качественные изменения. Измерения практически полностью переходят на цифровые методы, воплощенные в средствах измерений с цифровым отсчетом и регистрацией; существенно расширяются диапазоны измеряемых величин, например, по мощности – от долей микроватт до сотен и даже тысяч киловатт, по напряжению – от долей микровольт до сотен тысяч вольт, по частоте – от  $10^{-2}$  Гц до  $3 \cdot 10^{12}$  Гц и более, по величине сопротивления – от  $10^{-6}$  Ом до  $10^{12}$  Ом и т. д.

В измерительных системах широко применяется цифровая микроэлектроника и компьютерная техника, возникла необходимость в измерении характерных случайных процессов, что влечет увеличение доли статистических измерений и другие. Все это требует нового подхода к состоянию средств измерений, к соответствию их метрологических характеристик и свойств установленным нормам.

Функциональные возможности традиционных измерительных приборов задаются при производстве и затем перестроить их или изменить число каналов измерения и анализа достаточно проблематично. И поскольку производитель не в состоянии охватить все многообразие реальных исследовательских задач, это в значительной степени затрудняет подбор оптимального комплекта оборудования с требуемыми параметрами и его перестройку. Измерительные автоматизированные приборы и системы снимают это ограничение.

Информационные технологии вывели измерительную технику на новый уровень, позволяющий быстро и с меньшими затратами разрабатывать информационно-измерительные приборы и системы различной сложности: от измерения параметров до ввода и обработки видеоизображений с передачей результатов через внешнюю сеть на любые расстояния.

Появление измерительных информационных комплексов и систем, а также приборов с применением специализированных микропроцессорных, компьютерных и виртуальных технологий вызвано следующими аспектами:

- широким распространением специализированных многофункциональных микропроцессоров и персональных компьютеров, имеющих высокое быстродействие, большие объемы памяти, стандартные интерфейсы, практически неограниченные графические возможности, что позволяет создать функционирующие в реальном масштабе времени виртуальные измерительные устройства, воспроизводящие поведение тех или иных физических приборов и систем с высокой степенью подобия;

- созданием автоматизированных информационно-измерительных систем различного назначения, таких как автоматизированные системы научных исследований и комплексных испытаний, физические и космические объекты и другие;

- возможностью реализации в весьма компактной форме измерительных приборов и модулей;

- появлением измерительного программирования, под которым понимается программирование для информационно-измерительной техники и систем, позволяющее ей проводить измерения, контроль, диагностирование или распознавание образов, включая функции сбора, передачи, обработки, представления измерительной информации и управления измерительным экспериментом.

## 6.2 Цифровые измерительные приборы

В цифровых измерительных приборах (ЦИП) автоматически вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, а показания представляются в цифровой форме. Благодаря этому их применение имеет ряд преимуществ по сравнению с применением аналоговых приборов: измерения становятся более удобными; точность измерений значительно возрастает, а промахи практически полностью исключаются; на базе ЦИП удобно и целесообразно проектировать многофункциональные измерительные приборы – мультиметры, которые измеряют несколько физических величин (как электрических, так и неэлектрических); возможна автоматизация процессов измерения и обработки измерительной информации, что позволяет создавать на их основе ИИС и ИВК; наконец, именно в ЦИП широко внедряются микропроцессоры, и это придает им новые возможности и качества. Все эти достоинства позволяют считать, что разработка ЦИП еще долгое время будет одним из самых перспективных направлений измерительной техники.

Обобщенная структурная схема ЦИП приведена на рисунке 6.1.

Измеряемая величина  $X$  подается на ВУ, с помощью которого она выделяется из помех и масштабно преобразуется.

Основным функциональным узлом любого ЦИП является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), в некоторых типах ЦИП цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). АЦП преобразует измеряемую непрерывную (аналого-

вую) величину  $X'$  в цифровой код  $N$ . Процесс преобразования включает в себя три стадии (рисунок 6.2).

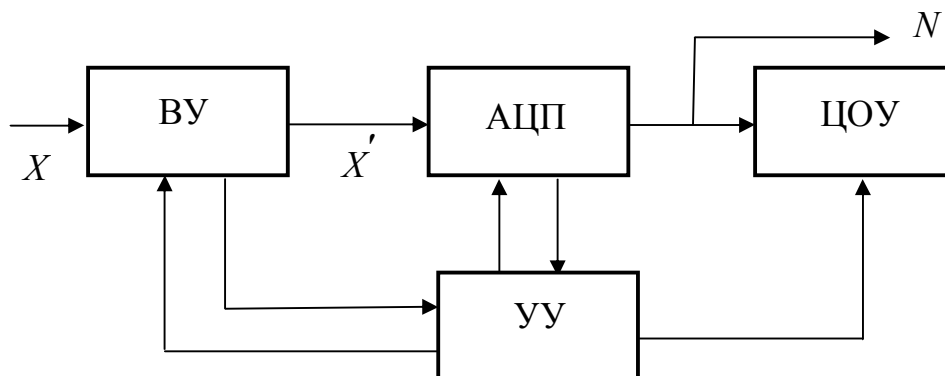


Рисунок 6.1 – Обобщенная структурная схема ЦИП

Под *дискретизацией* измеряемой величины  $X(t)$  во времени понимают преобразование ее в дискретную величину путем сохранения мгновенных значений  $X(t)$  только в определенные моменты времени ( $t_1 - t_n$ ) (рисунок 6.2, а). Промежуток времени между двумя ближайшими моментами дискретизации  $\Delta t$  называют *шагом дискретизации*, который может быть как постоянным (равномерная дискретизация), так и переменным (неравномерная дискретизация).

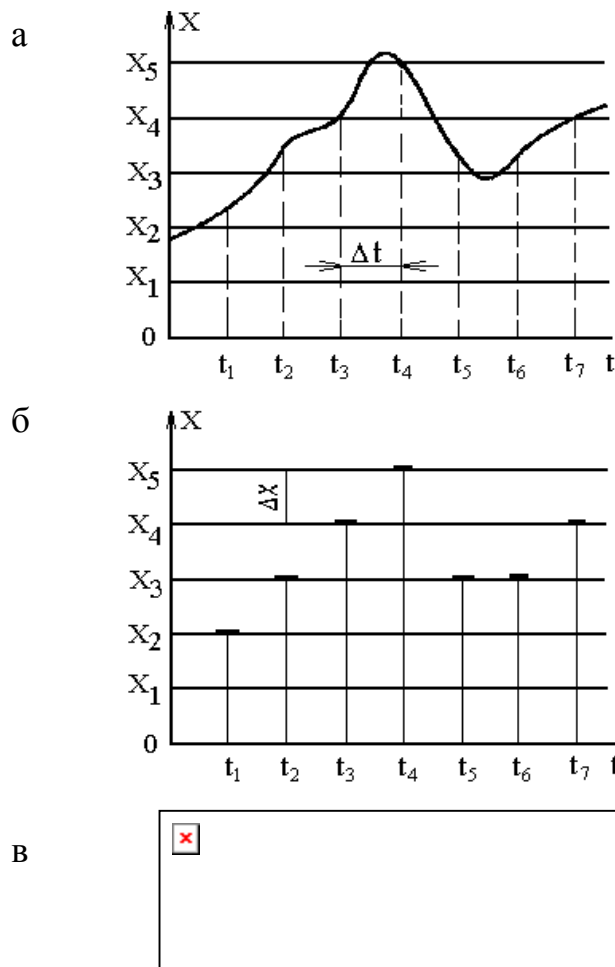
Под *квантованием* измеряемой величины  $X(t)$  по уровню понимают операцию замены ее истинных мгновенных значений ближайшими фиксированными величинами из некоторой совокупности дискретных значений, называемых *уровнями квантования* ( $X_1 - X_n$ ) (рисунок 6.2, б). Уровни квантования представляются соответствующими числами, поэтому операция квантования аналогична с математической точки зрения округлению чисел. Разность  $\Delta X$  между двумя соседними уровнями квантования называют *шагом (ступенью) квантования*.  $\Delta X$  как и  $\Delta t$  может быть постоянным (равномерное квантование) и переменным (неравномерное квантование).

*Цифровое кодирование* квантованных уровней заключается в формировании дискретных сигналов, несущих информацию об их значениях (рисунок 6.2, в). Обычно это последовательность кратковременных импульсов, число которых ( $N_i$ ) пропорционально квантованному значению (унитарный код). После АЦП код  $N$  подается на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ), где обрабатывается и индуцируется в виде ряда цифр, воспроизводящих результаты измерения. Цифровые коды могут выводиться и во внешние устройства, например в компьютер для дальнейшей обработки и хранения. Управляет работой ЦИП устройство управления (УУ), которое вырабатывает и подает командные сигналы во все функциональные узлы прибора.

В ЦИП могут быть реализованы различные методы аналого-цифрового преобразования и структурные схемы АЦП.

В зависимости от метода аналого-цифрового преобразования измеряемого сигнала ЦИП подразделяются на следующие виды:

- ЦИП, реализующие времяимпульсный метод преобразования;
- ЦИП, реализующие частотно-импульсный метод преобразования;
- ЦИП, реализующие кодоимпульсный метод преобразования.



- а – дискретизация измеряемой величины во времени;
- б – квантование измеряемой величины по уровню;
- в – цифровое кодирование

Рисунок 6.2 – Процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой код

В зависимости от типа АЦП, т. е. способа преобразования входного сигнала, ЦИП подразделяются на две группы:

- приборы прямого преобразования;
- приборы сравнения (уравновешивающего (компенсационного) преобразования, которое в свою очередь в зависимости от характера изменения во времени компенсирующей величины  $X_k$ , делят на приборы развертывающего и следящего уравновешивания.

В зависимости от значения измеряемого параметра ЦИП делятся на:

- неинтегрирующие, измеряющие мгновенное значение входного сигнала;
- интегрирующие, измеряющие среднее за выбранный интервал времени значение входного сигнала.

Наиболее важными характеристиками ЦИП, определяющими возможность их использования для конкретной измерительной задачи, являются: пределы измерения, входное сопротивление, быстродействие, помехоустойчивость, надежность и погрешность.

*Разрешающая способность* – это изменение цифрового отсчета на единицу младшего разряда.

Класс точности ЦИП определяет *цена единицы наименьшего разряда кода* или *номинальная ступень квантования*, если она больше цены единицы наименьшего разряда кода.

*Быстродействие* определяется максимальным интервалом времени, необходимым для выполнения одного полного цикла измерения входной величины (это время измерения и время индикации). Для ЦИП с равномерной временной дискретизацией этот интервал измерения определяется шагом дискретизации  $\Delta t$ , а быстродействие – количеством измерений за 1 с., т. е.  $\frac{1}{\Delta t}$ .

*Помехоустойчивость ЦИП* – способность сохранять необходимую точность измерения при наличии различных возмущающих воздействий (помех).

Устранить влияние помех, появляющихся вместе с измеряемым сигналом на входных зажимах ЦИП, нельзя. Поэтому помехоустойчивость численно характеризуется степенью подавления помех на входе ЦИП. Оценка помехоустойчивости ЦИП обычно вычисляют по отношению к аддитивным помехам, т. е. суммирующимся с полезным сигналом.

Операции дискретизации и квантования всегда связаны с потерей части исходной измерительной информации и поэтому являются источником погрешности, характерной только для ЦИП. Эта погрешность называется погрешностью дискретности и, как следует из вышесказанного, имеет две составляющие. Составляющая погрешности дискретности за счет дискретизации измеряемой величины во времени минимизируется за счет правильного выбора шага дискретизации  $\Delta t$ . Составляющая погрешности дискретности за счет квантования по уровню, по сути погрешность округления, определяется шагом квантования  $\Delta X$ .

С другой стороны, так как  $\Delta X$  определяет младший разряд числа, представляющего результат измерения, то погрешность округления можно нормировать как  $\pm 1$  единица младшего разряда счета. Совершенно ясно, что при правильном выборе числа разрядов погрешность дискретности может быть сделана весьма малой и не является каким-то дополнительным принципиальным ограничением для ЦИП по сравнению с аналоговыми приборами. Более того, в реальных ЦИП погрешность дискретности принимают равной  $\pm 1$  единице младшего разряда счета. Основная погрешность ЦИП определяется пределом допускаемой основной относительной погрешности (выраженной в процентах от показания прибора) по формуле

$$\delta_{\text{п}} = \pm \left[ c + d \cdot \left( \frac{x_k}{X} - 1 \right) \right] . \quad (6.1)$$

Таким образом, ЦИП наиболее полно удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к измерительной аппаратуре в настоящее время: высо-

кие точность и быстродействие, автоматизация процессов измерения и обработки их результатов.

### 6.3 Автоматизация измерений

Проблема автоматизации измерений была актуальной на протяжении многих лет и остается таковой в настоящее время. Развитие научных исследований, разработка новых устройств и систем с использованием современных технологий, усложнение их производства, а также повышение требований к точности измерений и их быстродействию привели к необходимости измерять и контролировать одновременно от сотен до нескольких тысяч различных физических величин. Естественная физическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке таких больших объемов измерительной информации стала главной причиной развития автоматизации измерений, наиболее активный этап которой начался в 70-е годы прошлого столетия. Автоматизация процесса измерений дает значительный выигрыш во времени и в большинстве случаев значительно повышает точность измерений.

По уровню автоматизации все средства измерений делятся на три основные группы:

- неавтоматические, которые позволяют провести измерения непосредственно оператору;
- автоматизированные, которые способны провести в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции;
- автоматические, производящие в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей, хранением данных и выработкой управляющих сигналов.

В настоящее время все большее распространение получают автоматизированные и автоматические средства измерений.

По степени участия в процессе автоматизации человека принято различать *частичную* и *полную* автоматизацию. При частичной автоматизации, т. е. в автоматизированных системах, только часть измерительных операций выполняется без участия оператора. Человек в данном случае остается элементом в цепи получения измерительной информации. При полной автоматизации, т. е. в автоматических системах, весь процесс измерения осуществляется без участия человека.

*Неавтоматические СИ* – это традиционные аналоговые и цифровые приборы, в том числе и многофункциональные, и универсальные.

*Автоматизированные СИ* – это автономные микропроцессорные измерительные приборы, предназначенные для измерения заданных физических величин, а также параметров сигналов и цепей. Это цифровые приборы, в которых часть операций осуществляется автоматически с помощью специализированного микропроцессора. Для таких измерительных приборов можно выделить следующие характерные положительные особенности.

Микропроцессорные измерительные приборы сравнительно легко реализуются как многофункциональные. В отличие от традиционных многофункциональных приборов с жесткой логикой эти СИ являются программно-

управляемыми и их функциональные возможности в основном определяются набором программ, хранящихся в ПЗУ. Упрощается процесс управления прибором, так как все или большинство функций прибора реализуются в соответствии с заданной оператором программой. В результате уменьшается число органов управления на передней панели прибора.

Появляются широкие возможности для выполнения вычислительных процедур в процессе проведения, например, косвенных или совокупных измерений. Необходимые в этих случаях рутинные вычисления погрешностей косвенных измерений или решение систем уравнений при совокупных измерениях возлагаются на микропроцессор. За счет этого существенно повышается производительность измерительных работ и сложная процедура измерений воспринимается как прямое измерение.

Применение микропроцессоров позволяет накапливать результаты промежуточных измерений и использовать их по определенному алгоритму для получения статистических характеристик исследуемых процессов или для получения метрологических характеристик измерительных приборов, например, за счет снижения (исключения) систематических, случайных или грубых погрешностей.

Использование в измерительных приборах микропроцессоров позволило не только расширить возможности и улучшить метрологические характеристики измерительных приборов, но и создавать на их основе информационно-измерительные системы. Это возможно благодаря тому, что цифровые микропроцессорные приборы и мини-ЭВМ (ПЭВМ) построены по одинаковым принципам, имеют многие идентичные узлы, объединяемые с помощью специальных технических устройств и программных средств (интерфейсов) в единую программно-управляемую систему: объект контроля, СИ и ЭВМ.

*Автоматические СИ* – это измерительные системы различного назначения. Назначение любой измерительной системы, ее необходимые функциональные возможности, технические параметры и характеристики в решающей степени определяются объектом исследования, для которого она создана. Большое разнообразие и быстрое развитие ИС затрудняет их полное и четкое толкование.

В простейших ИС преобладают функции измерения, а функции обработки и хранения незначительны или отсутствуют совсем. Классификация таких ИС приведена на рисунке 6.3. В соответствии с этой классификацией ИС подразделяются на системы прямых и статистических измерений. При прямых измерениях измерительная информация представляется в виде именованных чисел или отношений измеряемых величин и выдается, как правило, оператору.

В статистических системах измерительная информация может подвергаться математической обработке и выдаваться результат косвенных, совместных или совокупных измерений, а также параметры распределений вероятностей случайных величин.

В зависимости от вида и числа элементов, содержащихся в схеме измерений, ИС подразделяют на следующие разновидности: многоканальные (с параллельной структурой); сканирующие (с последовательной структурой); мульт-



типлицированные (с общей мерой) и многоточечные (с параллельно-последовательной структурой).

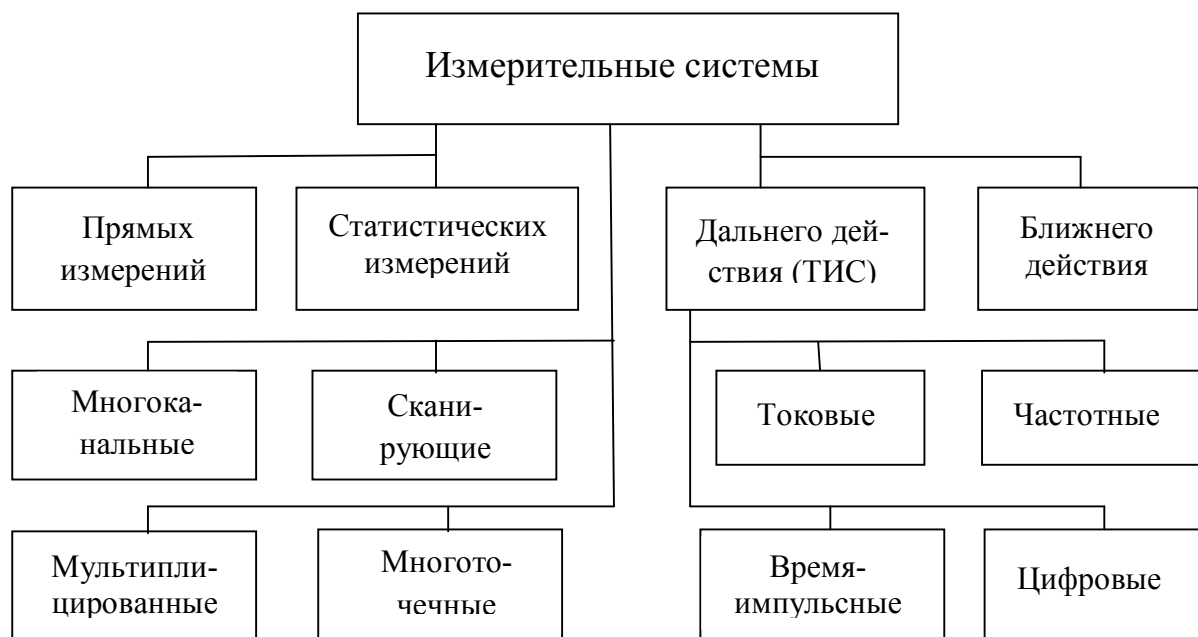


Рисунок 6.3 – Классификация измерительных систем

ИС делят также на системы ближнего и дальнего действия. В системах дальнего действия (телеизмерительных системах) объекты измерения находятся на значительном удалении от средств представления или обработки информации. Поэтому телеизмерительные системы (ТИС), в отличие от систем ближнего действия, для передачи информации имеют канал связи. В зависимости от параметра сигнала, несущего измерительную информацию, ТИС подразделяются на токовые, частотные, времяимпульсные и цифровые.

Наиболее бурно в настоящее время разрабатываются и внедряются прямые ИС, самым широким классом которых являются информационно-измерительные системы (иногда их обозначают термином измерительные информационные системы), аббревиатура одинакова – ИИС.

#### 6.4 Информационно-измерительные системы

ИИС – совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки в целях представления потребителю (в том числе ввода в АСУ) в требуемом виде либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации.

Как следует из этого определения, ИИС поставляет потребителю информацию в соответствии с ее назначением и, следовательно, наряду с измерением обеспечивает все необходимое информационное обслуживание контролируемого объекта, включая автоматический сбор, представление, передачу, запоминание, регистрацию и обработку измерительной информации.

Можно считать, что ИИС обеспечивают все необходимое для реализации других более сложных информационных процедур: контроля, диагностики, управления и др. В то же время измерение, контроль, диагностика, управление имеют единую информационную природу, а их общим элементом технической реализации является ИИС. Основываясь на указанной общности, в ряде случаев ИИС разделяют по назначению на системы автоматического контроля и системы технической диагностики. Выделяют также системы распознавания образов и системы единого времени.

В современной технической литературе кроме рассмотренного выше понятия ИИС часто используют следующие тождественные понятия: автоматизированные измерительные системы (АИС), автоматизированные измерительные комплексы (АИК), измерительно-вычислительные комплексы (ИВК). Все указанные системы и комплексы решают примерно одинаковые задачи, а их отличие от ИИС, как правило, заключается в различии удельного веса устройств, решающих измерительные и вычислительные задачи.

*Системы автоматического контроля (САК)*, являясь разновидностями ИИС, обеспечивают контроль за состоянием различных объектов. В отличие от ИИС, в САК измеряемая величина сравнивается не с мерой, а с нормой, что позволяет установить соответствие между состоянием объектов и заданной нормой, т. е. выдавать информацию об исправности или неисправности контролируемого объекта. Если САК могут выдавать информацию о предполагаемом состоянии объекта в будущем, то это *прогнозирующий контроль*.

Современные САК подразделяются на системы непрерывного контроля и системы с дискретным последовательным контролем параметров объекта. При непрерывном контроле параметров объекта САК содержат в каждом канале контроля сравнивающее устройство (СУ) и устройство индикации отклонений. При дискретном контроле САК имеют одно СУ (параметры которого при необходимости могут меняться) и измерительный коммутатор (ИК), управляемый устройством управления (УУ). Информация с объекта контроля в таких системах поступает на СУ через ИК поочередно.

*Системы технической диагностики (СТД)* в отличие от САК не только выдают информацию о состоянии контролируемого объекта (исправен или неисправен), но и обеспечивают локализацию места неисправности (отказа). Задача отыскания узла, вызвавшего неисправность, является наиболее сложной в процессе диагностики.

Основой построения современной ИИС является агрегатный (модульный) принцип, который позволяет создавать измерительную систему из конструктивно законченных изделий. Получили распространение два вида агрегатных измерительных систем: приборно-модульные и функционально-модульные. В приборно-модульных измерительных системах агрегируемыми модулями являются приборы, а в функционально-модульных – функциональные узлы измерительных приборов: усилители, преобразователи, функционально законченные измерительные платы (одноплатные приборы) и др.

Взаимодействие модулей в ИИС осуществляется на интерфейсной основе. По отношению к интерфейсу каждый модуль ИИС может быть контроллером, прибором-источником (ПИ) или прибором-приемником (ПП) информации. Контроллер осуществляет управление обменом информацией, он координирует и контролирует действия отдельных устройств, т. е. это управляющий модуль. Передатчик (источник) передает информацию в другие приборы, а приемник воспринимает информацию от других модулей. Каждый из модулей ИИС может выполнять одну или несколько из указанных функций.

Принципиально важной задачей, решаемой при создании ИИС, является обеспечение совместимости модулей. *Совместимость модулей* – это их приспособленность к согласованной совместной работе в предусмотренных состояниях. Различают следующие виды совместимостей: информационную, электрическую, энергетическую, конструктивную, метрологическую, эксплуатационную. Их основная суть заключается в следующем.

*Информационная совместимость* обеспечивается путем унификации и нормирования видов и параметров сигналов на входах и выходах сопрягаемых модулей, а также нормирования алгоритмов обмена данными между ними. Информационные взаимосвязи обеспечиваются сигналами нескольких разновидностей: управляющими, программными, информационными, адресными и др.

*Электрическая совместимость* распространяется на статические и динамические параметры электрических сигналов, а также среду их распространения и техническую реализацию приемопередающих элементов. Для обеспечения электрической совместимости устанавливают: уровни сигналов и пределы их изменения; значения допустимой емкости и резистивной нагрузки устройств; допустимые длины линий и порядок их подключения к разъемам; средства и способы обеспечения помехоустойчивости.

*Энергетическую совместимость* определяют требования к виду и параметрам питающих напряжений. Энергетическая совместимость наиболее важна для измерительных систем функционально-модульного построения.

*Конструктивная совместимость* предполагает совместимость конструктивных параметров модулей при их совместном использовании или унификацию модулей и их компоновку в единый конструктивно законченный комплекс. Унификации подлежат габаритные и присоединительные размеры плат, модулей, шкафов, кронштейнов, направляющих каркасов, разъемов и др.

*Метрологическая совместимость* предусматривает однотипность метрологических характеристик всех СИ, используемых в измерительной системе, и сопоставимость результатов измерений.

*Эксплуатационная совместимость* предполагает для всех элементов системы единые требования по надежности, уровню электромагнитных помех и др.

Основной функцией ИИС, как и любой другой технической системы, является целенаправленное преобразование входной информации в выходную. Это преобразование выполняется либо автоматически с помощью аппаратуры технического обеспечения (технической подсистемы ИИС), либо совместно –

оперативным персоналом и аппаратурой технического обеспечения в сложных ИИС, ИВК и виртуальных приборах.

Наряду с техническим обеспечением ИИС может содержать и другие виды обеспечения. Полная структура обеспечения ИИС приведена на рисунке 6.4.

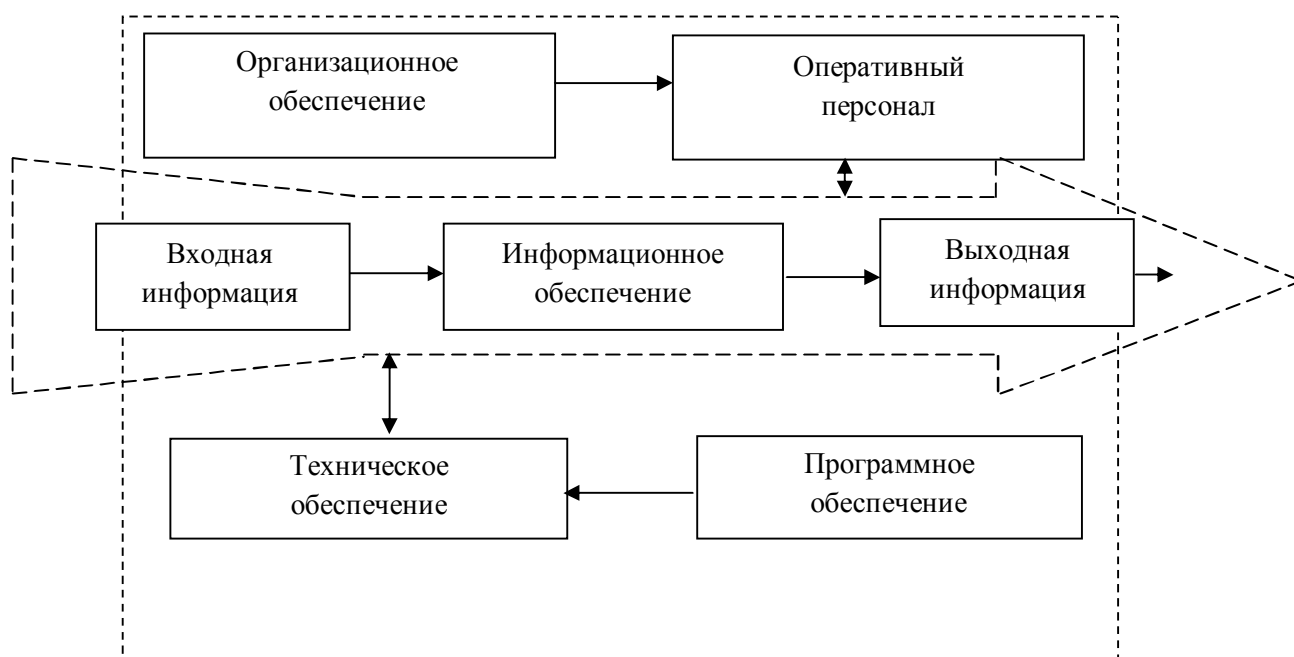


Рисунок 6.4 – Структура метрологического обеспечения ИИС

Математическое, программное и информационное обеспечение входит в состав лишь ИИС с вычислительными комплексами.

*Математическое обеспечение* – аналитические (математические) модели объекта исследования (измерения) и вычислительные алгоритмы.

*Программное обеспечение* ИИС включает в себя системное и общее прикладное программное обеспечение, которое реализуется программной подсистемой.

*Информационное обеспечение* определяет способы и конкретные формы информационного отображения состояния объекта исследования в виде документов, диаграмм, графиков, сигналов для их представления обслуживающему персоналу и компьютеру для дальнейшего использования в управлении.

Но вся ИИС в целом должна быть обеспечена метрологически.

По организации алгоритма функционирования различают следующие ИИС:

– *с заранее заданным алгоритмом работы*, правила функционирования которых не меняются, и поэтому их можно использовать для исследования объектов, работающих только в постоянном режиме;

– *программируемые*, в которых изменяют алгоритм работы по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;

– *адаптивные*, алгоритм работы которых, а часто и структура изменяются, приспособляясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта исследования;

– *интеллектуальные*, обладающие способностью к перенастройке в соответствии с изменяющимися условиями функционирования и способные выполнять все функции измерения и контроля в реальном масштабе времени.

Информационно-измерительная система должна: управлять измерительным процессом или экспериментом в соответствии с принятым критерием функционирования; выполнять возложенные на нее функции в соответствии с назначением и целью; обладать требуемыми показателями и характеристиками точности, помехоустойчивости, быстродействия, надежности, пропускной способности, адаптивности, сложности; отвечать экономическим требованиям, предъявляемым к способам и форме представления информации, размещения технических средств; быть приспособленной к функционированию с измерительными информационными системами смежных уровней иерархии и другими ИИС.

По своим функциональным возможностям и времени возникновения ИИС можно разделить на ряд поколений. В настоящее время бурно развивается *пятое поколение* ИИС. Это обусловлено появлением адаптивных, интеллектуальных и виртуальных ИИС, построенных на базе персональных компьютеров и современного математического и программного обеспечения.

## 6.5 Понятие об интерфейсах

*Интерфейс* (от англ. *interface* – сопрягать, согласовывать) – это устройство сопряжения. Применительно к ИИС под интерфейсом обычно понимается совокупность механических, электрических и программных средств, позволяющих объединить в единую систему объект контроля, СИ и ЭВМ. Интерфейсы, используемые в измерительной технике, принято называть *измерительными интерфейсами*.

В соответствии с видами агрегируемых систем различают *системно-приборные* и *системно-модульные* интерфейсы. Применительно к ЭВМ существует понятие машинных интерфейсов, позволяющих осуществить соединение центрального процессора ЭВМ с другими ее функциональными блоками и периферийными устройствами.

Наряду с понятием «интерфейс» часто используют понятие «протокол». *Протокол* – это строго заданная процедура или совокупность правил, определяющая способ выполнения определенного класса функций соответствующими устройствами. Практически любой интерфейс содержит некоторые элементы протокола. В этом смысле понятие «интерфейс» шире понятия «протокол».

В настоящее время известно большое многообразие интерфейсов, которые можно классифицировать по ряду признаков (таблица 6.1).

*По способу соединения функциональных блоков* (по топологии) различают магистральные, радиальные, цепочные и смешанные интерфейсы, графическое представление которых приведено на рисунке 6.5.

В цепочных интерфейсах (рисунок 6.5, а) модули соединены последовательно. Управляющий модуль в таких структурах может отсутствовать. Применяют цепочные интерфейсы в сравнительно простых системах с малым числом автономных приборов. Если вход и выход цепочки подключаются к управляю-

щему модулю, то цепочную структуру называют петлевой. В чисто цепочной структуре происходит последовательная обработка информации по мере ее продвижения по цепочке. Каждый модуль выделяет предназначенное для него сообщение и на его место размещает свое. В петлевой структуре образуется последовательная магистраль, и любой модуль практически имеет доступ к управляющему модулю.

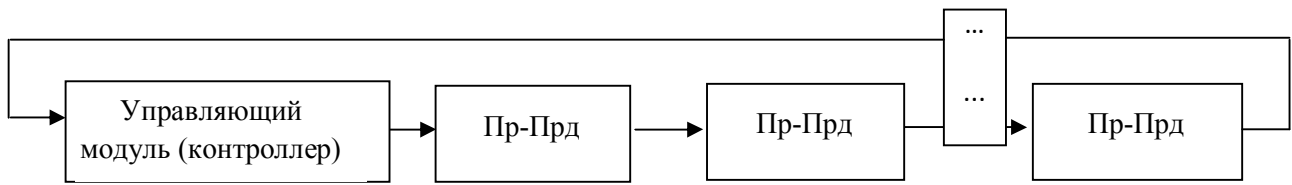
Таблица 6.1 – Классификация интерфейсов

Признак	Виды интерфейсов
По способу соединения функциональных блоков ИИС	Магистральные, радиальные, цепочные, смешанные
По способу передачи информации в ИИС	Параллельные, последовательные, параллельно-последовательные
По принципу обмена информацией	Синхронные, асинхронные
По режиму передачи информации	Двусторонне-одновременные, двусторонне-поочередные, односторонние
По функциональному назначению	Системные, мультипроцессорных систем, периферийного оборудования, сетей передачи данных, модулей и приборов, локальных вычислительных сетей, распределенных систем, локальных сетей микроконтроллеров
По конструктивному исполнению	Межблочные, внутриблочные, внутриплатные, внутрикорпусные

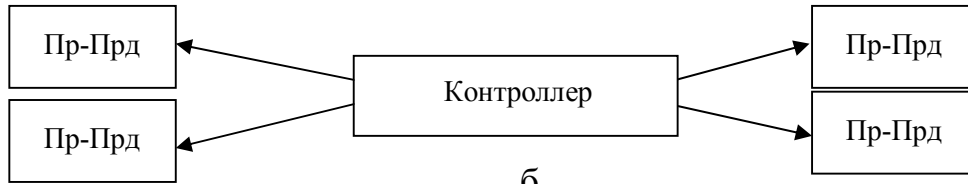
В радиальной структуре (рисунок 6.5, б) каждый модуль связан с управляющим модулем индивидуальной шиной. Адресация определяется номером индивидуальных шин. Скорость обмена информацией в такой структуре максимальная. Если управляющий модуль имеет возможность подключаться к большому количеству линий, то необходимы расширители ввода-вывода, а это требует необходимости адресации модулей, т. е. теряется достоинство радиальной структуры. Широкое распространение радиальных структур ограничивается трудностями наращивания или перестройки.

В системах с магистральной структурой (рисунок 6.5, в) модули подключают к коллективной шине. Есть возможность обмена информацией между любыми модулями и возможность поочередного управления от нескольких управляющих модулей. По сравнению с радиальной структурой здесь меньше затрат на соединительное оборудование, но скорость обмена ниже. В настоящее время данная система получила широкое распространение. Наиболее предпочтительное ее использование – в системах с большим количеством модулей.

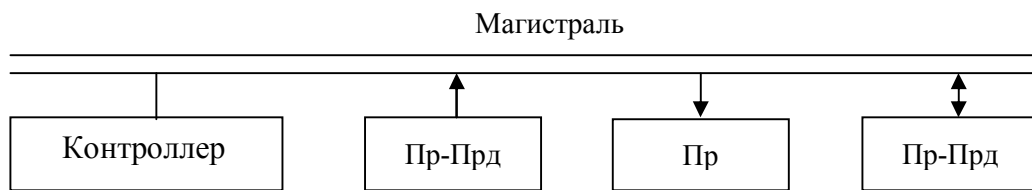
Пример смешанной структуры соединения показан на рисунке 6.5, г. Смешанное (гибридное) соединение модулей дает возможность повысить производительность отдельных подсистем, уменьшить конструктивную и энергетическую избыточность.



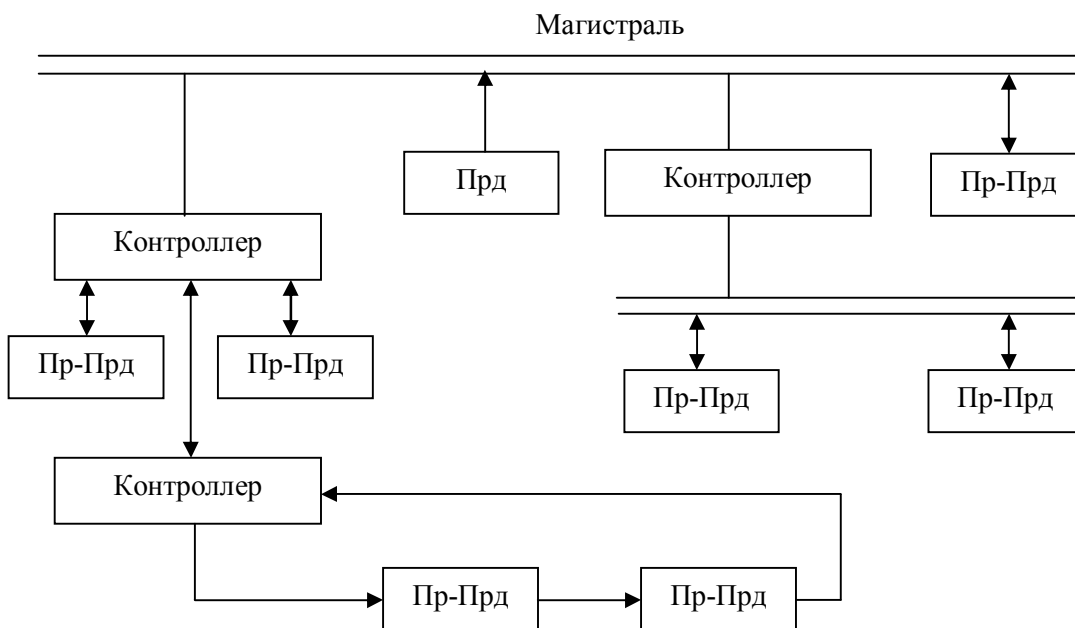
а



б



в



г

Пр – приемник; Прд – передатчик

Рисунок 6.5 – Графическое представление различных интерфейсов

*По способу передачи информации различают параллельные, последовательные и параллельно-последовательные системы.*

В параллельных интерфейсах обмен информацией (данными) осуществляется за один такт обмена (одну посылку). Параллельный обмен предполагает фиксированную разрядность устройств.

При последовательном обмене все сообщения передаются последовательно по общей линии. Последовательная структура интерфейса находит при-

менение в территориально разнесенных системах или системах с распределенной обработкой информации с малой интенсивностью потока информации.

Смешанный последовательно-параллельный (байтовый) способ широко используется в системах с различной разрядностью представления данных у разных устройств.

*По принципу обмена информацией* интерфейсы подразделяют на синхронные и асинхронные.

В *синхронных* интерфейсах задаются фиксированные циклы сообщений. Для фиксации циклов обычно используются синхроимпульсы, которые могут передаваться по отдельным линиям. При синхронном обмене все приемники информации должны иметь быстродействие не ниже передатчика, который определяет темп выдачи единиц сообщений.

В *асинхронных* интерфейсах передатчик и приемник информации обмениваются сигналами о выдаче и приеме данных. В этом случае наличие дополнительных управляющих сигналов, передаваемых по специальным линиям, обязательно. Управляющие сигналы в асинхронной системе иницируются либо передатчиком, либо приемником в зависимости от этапа процесса приема-передачи информации. Обычно управляющий сигнал, сопровождающий данные на выходе передатчика, существует до момента подтверждения приемником факта приема данных. Цикл обмена здесь не является фиксированным. Асинхронный принцип находит наибольшее применение.

*По режиму передачи информации* различают следующие интерфейсы: с двусторонней одновременной передачей (дуплексные); с двусторонней поочередной передачей (полудуплексные); с односторонней передачей (симплексные).

Дуплексный режим предусматривает наличие двух линий обмена и отличается наибольшей интенсивностью обмена. Полудуплексный режим применяется при магистральном соединении модулей и в системах с разделением во времени. Симплексный режим используется в петлевых структурах.

Заметим, что рассмотренные способы и режимы передачи влияют на число интерфейсных линий. Например, восемь двунаправленных линий – это параллельно-последовательный (бит – параллельно, байт – последовательно) полудуплексный интерфейс. В перспективных интерфейсах в основном применяют двунаправленные линии.

В соответствии с *функциональным назначением* различают следующие интерфейсы: системные (машинные или ввода–вывода) интерфейсы ЭВМ, сосредоточенных магистральных мультипроцессорных систем, периферийного оборудования (общего назначения и специализированные), сетей передачи данных (стыки и протоколы), программно-управляемых модульных систем и приборов; локальных вычислительных сетей различных типов, распределенных систем общего назначения и управления, малых локальных сетей микроконтроллеров.

*По конструктивному исполнению* интерфейсы делят на следующие категории: межблочные, обеспечивающие взаимодействие компонентов на уровне автономного устройства, блока, стойки, шкафа; внутриблочные, обеспечивающие взаимодействие на уровне субблоков, модулей, плат; внутрислатные,



обеспечивающие взаимодействие между интегральными схемами (СИС, БИС, СБИС); внутрикорпусные, обеспечивающие взаимодействие компонентов внутри СБИС.

Возможные средства конструктивной реализации указанных интерфейсов следующие: межблочная – многожильный, коаксиальный, волоконно-оптический кабель; внутриблочная – скрученная витая пара, печатные проводники платы; внутрислойная – печатные проводники платы; внутрикорпусная – микроэлектронные проводники.

Создание интерфейсов для каждой измерительной задачи или групп близких задач экономически невыгодно, поэтому обычно на практике используются стандартные интерфейсы. Многолетняя работа специалистов разных стран в области автоматизации вычислительных процессов и измерений привела к созданию большого количества стандартных интерфейсов.

*Стандартный интерфейс* – это совокупность унифицированных технических, программных и конструктивных средств, необходимых для реализации взаимодействия различных функциональных элементов в системах обработки информации при условиях, предписанных стандартом и направленных на обеспечение информационной, электрической и конструктивной совместимости указанных элементов.

Стандартизация интерфейсов проводится в рамках международных и национальных организаций, таких, как Международная организация по стандартизации (ИСО, *ISO*), Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ, *CCITT*); Международная электротехническая комиссия (МЭК, *IEC*); Европейская ассоциация производителей вычислительных машин (*ЕСМА*); Европейский комитет стандартов по ядерной электронике (*ESONE*); Американский национальный институт стандартов (*ANSI*); Институт инженеров по электронике и радиоэлектронике (*IEEE*) и др.

Из множества существующих интерфейсов для приборно-модульных ИИС (АИС) наибольшее применение получили интерфейсы *HP-IB* (КОП), *HP-IL*, ИРПС, а для функционально-модульных ИИС – КАМАК, ЕВРОБАС, ФАСТБАС, *VXI* и др.

## 6.6 Виртуальные приборы и компьютерные измерительные системы

Понятие «виртуальные приборы» (*Virtual Instruments*) появилось на стыке измерительной, информационной и компьютерной техники. Виртуальный прибор (иногда его называют виртуальный инструмент) представляет собой комбинацию компьютера, универсальных аппаратных средств ввода–вывода сигналов и специализированного программного обеспечения, которое, собственно, и определяет конфигурацию и функционирование законченной системы. По сути, в руках создателя системы имеется конструктор (набор), из которого даже не очень искушенный в компьютерных технологиях инженер (исследователь) может построить измерительный виртуальный прибор практически любой сложности.

Практическим воплощением концепции виртуального инструмента стала среда разработки программ *LabVIEW*. Существенным отличием этой среды программирования от большинства существующих, где используются тесториентированные языки, является использование в ней языка графического программирования. Кроме того, в *LabVIEW* имеется большая библиотека функций и процедур, универсальных для большинства прикладных задач управления средствами измерения, сбора и обработки данных. В целом *LabVIEW* вообрал в себя наиболее перспективные подходы и решения современной технологии автоматизации измерений.

Программы, созданные в среде *LabVIEW*, имеют три основные составные части: переднюю панель, блок-диаграмму и пиктограмму. Передняя (лицевая) панель виртуального инструмента (ВИ) может содержать графическое изображение кнопок, клавиш, регуляторов и других органов управления и индикации. Конструирование лицевой панели в среде *LabVIEW* сводится к составлению картинки из различных индикаторов и управляющих элементов, находящихся в меню. Управление системой осуществляется путем изменения положений переключателей, поворота ручек управления и введения значений с клавиатуры.

Блок-диаграмма представляет собой графическое решение задачи. Она составляется на графическом языке программирования. Затем встроенный в *LabVIEW* компилятор транслирует программу в машинный код. Функциональными блоками, выбираемыми из меню, могут быть блоки элементарных алгебраических операций, функций сбора и анализа данных; сетевые операции и др.

Пиктограмма является графическим представлением ВИ в блок-диаграмме. Пиктограмма позволяет «свернуть» ВИ в «объект», который можно использовать в блок-диаграммах других ВИ в качестве функций.

Аппаратная составляющая виртуальных измерительных приборов, обеспечивающая ввод реальных сигналов измерительной информации, может реализовываться в виде встраиваемых в компьютер сменных плат или в виде внешних устройств.

Сменная встраиваемая плата сбора данных и управления (ПСДУ) (рисунок 6.6) содержит обычно следующие основные элементы: мультиплексор, обеспечивающий параллельный ввод сигналов; устройство выборки и хранения УВХ; аналогово-цифровой преобразователь АЦП; цифровой сигнальный микропроцессор МП. Обмен данными между ПСДУ и компьютером происходит либо через механизм прерываний, либо в режиме прямого доступа к памяти.

Информационный сигнал поступает с датчиков (Дат.) на ПСДУ через устройства согласования сигналов УСС, которые могут выполнять различные функции: усиление, питание датчиков, переключение реле, электрическую реализацию, фильтрацию сигналов и др.

Внешние устройства сбора данных и управления (УСДУ) (рисунок 6.7) начали разрабатывать и внедрять с появлением переносных портативных компьютеров. В таких устройствах преобразования сигнала в цифровую форму проводится несколькими полностью синхронизированными АЦП, реализован-

ными обычно в виде единой матрицы логических элементов. Такие устройства наиболее удобны для использования в полевых условиях.

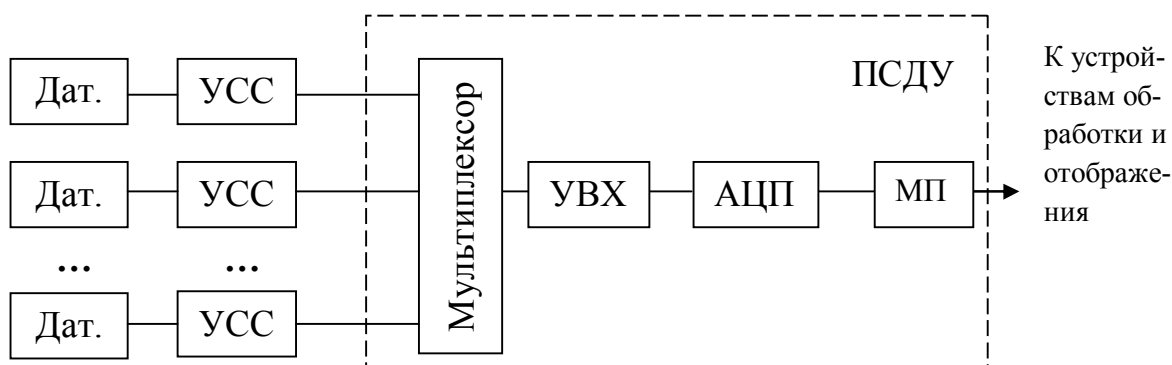


Рисунок 6.6 – Структура встраиваемой платы сбора данных и управления

Таки образом, набор аппаратных и программных средств, добавленных к обычному компьютеру и образующих ВИ, можно рассматривать как основу компьютерных измерительных систем (КИС). Взаимодействие между отдельными элементами системы в КИС осуществляется с использованием внутренней шины персонального компьютера, а стандартные измерительные приборы могут заменяться виртуальными приборами.

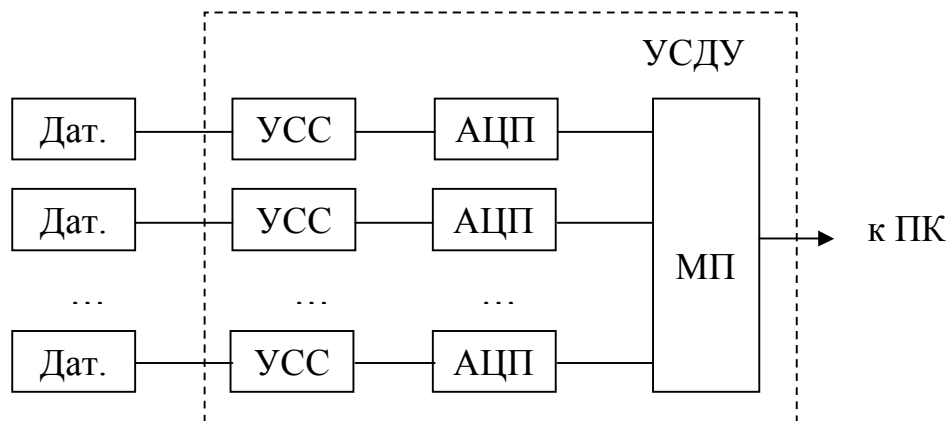


Рисунок 6.7 – Структура внешнего устройства сбора данных и управления

Характерной особенностью КИС является их открытость. Так, при использовании среды программирования *LabVIEW* имеется возможность создавать ВИ, работающие с реальным сигналом не только через плату сбора данных, но и с функционально-модульными интерфейсами *VXI*, *SAMAC*, *RS-232*. Для работы с указанными интерфейсами используют приборные драйверы, т. е. программы, которые управляют отдельными приборами. *LabVIEW* имеет свою библиотеку приборных драйверов, но это не исключает возможности создания любых других необходимых драйверов.

Виртуальный прибор (система) имитирует органы управления реального прибора и выполняет его функции, что позволяет инженеру, который умеет работать с этим прибором, продолжить работу с его виртуальным аналогом. Виртуальный прибор может содержать только те индикаторы и органы управления, которые необходимы для решения поставленной задачи. При этом обучение специалистов можно проводить на виртуальных аналогах реального оборудования, сохраняя его ресурс и не подвергая риску выхода из строя из-за ошибок оператора (обучающегося).

Несколько лет назад на пути развития технологии программирования и создания виртуальных приборов появилось новое многообещающее направление. Оно называется *IVI (Interchangeable Virtual Instruments* – взаимозаменяемые виртуальные инструменты). Основная идея такова. Все приборы одного класса имеют большую, общую для всех приборов группу функций, например, все цифровые мультиметры (*DMM*) измеряют постоянное и переменное напряжение, сопротивление, а также выполняют другие общие функции. Если эти функции выделить в *IVI Class Driver* для класса *DMM Class*, то часть программы, которая отвечает за управление цифровыми мультиметрами, не будет зависеть от конкретного прибора и его драйвера.

И конечно, современные программные системы немыслимы без удаленного доступа. Трудно себе представить ответственную современную систему, которая не имела бы выхода в Интернет.

## ЛИТЕРАТУРА

1 О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» : Закон Респ. Беларусь от 20 июля 2006 г. № 163-3 [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.gosstandart.gov.by/>.

2 О техническом нормировании и стандартизации : Закон Респ. Беларусь от 5 января 2004 г. № 262-3 [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.gosstandart.gov.by/>.

3 Об оценке соответствия требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации : Закон Респ. Беларусь от 5 января 2004 г. № 269-3 [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.gosstandart.gov.by/>.

4 Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебник для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под общ. ред. В. И. Нефедова, А. С. Сигова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2005.

5 Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / под общ. ред. Б. Н. Тихонова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007.

6 Елизаров, А. С. Электрорадиоизмерения : учебник для вузов / А. С. Елизаров. – Минск : Выш. шк., 1986.

7 Брянский, Л. Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. Юбилейная серия научных изданий / Л. Н. Брянский, А. С. Дойников, Б. Н. Крупин ; под общ. ред. М. В. Балахонова. – М. : ВНИИФТРИ, 2004.

8 Метрология и измерения : учеб.-метод. пособие для инд. работы студ. / А. П. Белошицкий [и др.] ; под общ. ред. С. В. Лялькова. – Минск : БГУИР, 1999.

9 Кострикин, А. М. Теоретическая метрология : учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 1 / А. М. Кострикин. – Минск : БГУИР, 1999.

10 Кириллов, В. И. Метрологическое обеспечение : учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 1 / В. И. Кириллов. – Минск : БГУИР, 2003.

11 Басов, В. Г. Информационно-измерительные системы : учеб.-метод. пособие. В 3 ч. Ч. 1 / В. Г. Басов. – Минск : БГУИР, 2006.

*Учебное издание*

**Ляльков Святослав Владимирович**  
**Гусынина Юлия Анатольевна**

## **МЕТРОЛОГИЯ**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

Редактор *Т. Н. Крюкова, Е. С. Чайковская*  
Корректор *А. В. Бас*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *А. А. Лысеня*

Подписано в печать 28.02.2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 8,02. Уч.-изд. л. 7,5. Тираж 100 экз. Заказ 1.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛП №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6