

## ИННОВАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА



**Проект 1:** инновационная среда университета в регионе и эффективное управление

**Цель:** развитие инноваций и инновационных образовательных программ на основе интеграции образования, науки и бизнеса для организации подготовки и переподготовки кадров по широкому спектру специальностей и направлений.

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет

А.Д. ПОЗДНЯКОВ

# КУРС ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ»

В двух частях

Часть 1

Владимир 2008

УДК 621.317.7  
ББК 32.842  
П47

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор  
зав. кафедрой теоретической физики  
Владимирского государственного педагогического университета  
*В.Г. Рау*

Доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой радиотехники и радиосистем  
Владимирского государственного университета  
*О.Р. Никитин*

Печатается по решению редакционного совета  
Владимирского государственного университета

**Поздняков, А. Д.**

П47 Курс лекций по дисциплине «Метрология и радиоизмерения». В 2 ч. Ч. 1 / А. Д. Поздняков ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 164 с. – ISBN 978-5-89368-863-4.

Предназначен для подготовки студентов в области радиоизмерений. Рассмотрены задачи метрологического обеспечения, стандартизации и сертификации, в том числе терминология, основные понятия и определения; основные нормативные положения и законодательные акты; методы обеспечения единства измерений; основы теории погрешностей измерений; методы обработки результатов измерений; способы нормирования и формы задания метрологических характеристик средств измерений.

Рекомендован для студентов 3-го курса всех форм обучения направления 210300 – радиотехника.

Табл. 10. Ил. 38. Библиогр.: 8 назв.

УДК 621.317.7  
ББК 32.842

ISBN 978-5-89368-863-4

© Владимирский государственный университет, 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых и наиболее важных сокращений .....	4
Введение.....	5
Лекция 1. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ .....	9
Лекция 2. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ.....	20
Лекция 3. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА.....	32
Лекция 4. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ЗА СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЙ .....	44
Лекция 5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	57
Лекция 6. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ .....	67
Лекция 7. ПОДГОТОВКА И ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.....	80
Лекция 8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА .....	94
Лекция 9. ЭТАЛОНЫ И МЕРЫ .....	107
Лекция 10. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ .....	120
Лекция 11. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ (ЦИП).....	131
Лекция 12. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ.....	140
Лекция 13. ПРИМЕРЫ СТРУКТУР ПОГРЕШНОСТЕЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	152
Заключение .....	162
Библиографический список .....	163

## **Список принятых и наиболее важных сокращений**

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь  
ВНИИМ – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии  
ВНИИМС – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы  
ВНИИФТРИ – Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений  
ГКИ – государственные контрольные испытания  
ГМС – Государственная метрологическая служба  
ГНМЦ – государственные научные метрологические центры  
ГПИ – государственные приемочные испытания  
ГСВЧ – Государственная служба времени и частоты  
ГСИ (или ГСОЕИ) – Государственная система обеспечения единства измерений  
ГСССД – Государственная служба стандартных справочных данных  
ГССО – Государственная служба стандартных образцов  
ИП – измерительный прибор  
МА – метрологическая аттестация  
МВИ – методика выполнения измерений  
МС – метрологическая служба  
МККР – Международный консультативный комитет по радиосвязи  
МЭК – Международная электротехническая комиссия  
НД – нормативная документация  
НСП – неисключенная систематическая погрешность  
НТД – нормативная техническая документация  
ОЕИ – обеспечение единства измерений  
ОСИ – образцовое средство измерений  
РИП – радиоизмерительный прибор  
СИ – средство измерений  
СКО – среднеквадратическое отклонение  
СНИИМ – Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии  
УНИИМ – Уральский научно-исследовательский институт метрологии  
ЦСМС – центр стандартизации, метрологии и сертификации  
ФВ – физическая величина  
ЭД – эксплуатационная документация

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что более чем за четыре тысячелетия до новой эры в Вавилоне и Египте уже проводили астрономические измерения. На протяжении всей истории перед человеком возникало множество проблем, для решения которых необходимо было располагать количественной информацией о том или ином свойстве объекта материального мира (явления, процесса, тела, вещества, изделия и пр.). Основной способ получения такой информации – *измерения*, при правильном выполнении которых находят результат, отражающий интересующие свойства объекта познания.

Измерения играют важнейшую роль в жизни человека. Можно сказать, что прогресс науки и техники определяется степенью совершенства измерений и измерительных приборов. По этому поводу Макс Планк сказал: «В физике существует только то, что можно измерить».

Основы отечественной метрологии заложил русский ученый Д.И. Менделеев (1834 – 1907 гг.). Роль и значение измерений он определял так: «В природе мера и вес суть главное орудие познания. Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука немыслима без меры». История развития техники *электрических измерений* связана с именами русских ученых М.В. Ломоносова и Г.В. Рихмана, которые в 40-х гг. XVIII в. сконструировали первый в мире электроизмерительный прибор и назвали его *указателем электрической силы*.

Внедрение техники радиотехнических измерений обусловлено развитием систем радиосвязи и радиоэлектроники. Существенное внимание данным вопросам уделял крупнейший русский ученый, изобретатель радио А.С. Попов. Основоположителем отечественной радиоизмерительной техники считается академик М.В. Шулейкин, организовавший в 1913 г. первую заводскую лабораторию по производству радиоизмерительных приборов.

Чтобы успешно справляться с многочисленными и разнообразными проблемами радиоизмерений, современному специалисту необходимо освоить ряд общих принципов их решения, определить единую научную и законодательную базу, обеспечивающую на практике высокое качество измерений независимо от того, где и с какой целью они выполняются. Такой базой является *метрология* (от греческих

слов «метрон» – мера, «логос» – учение) – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

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

Важная особенность метрологии – ее законодательный характер: в нашей стране действует комплекс государственных стандартов, объединенных в *Государственную систему обеспечения единства измерений*. Раздел метрологии, включающий комплексы взаимосвязанных общих правил, требований и норм, а также вопросы регламентации и государственного контроля, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений, называется *законодательной метрологией*. Она предписывает соответствующий надзор за средствами измерений, который осуществляется подразделениями метрологической службы, обеспечивающей единообразие средств измерений. В метрологии, как и в любой другой науке, недопустимо произвольное толкование применяемых терминов.

Современная метрология включает в сферу своей деятельности разработку методов определения значений важнейших физических констант, необходимых для многих отраслей науки и техники. Метрология обеспечивает потребителей стандартными образцами веществ и материалов, состав и физико-химические характеристики которых определены с необходимой точностью. Методы метрологии широко используются в смежных отраслях знаний, таких как оценивание и контроль качества изделий микроэлектроники, аттестация программ и алгоритмов обработки данных и т.д.

Следует обратить внимание на то, что на современном этапе научно-технической революции в метрологии, и в частности в радиоизмерительной технике, происходят значительные качественные изменения. Измерения практически полностью переходят на цифровые методы преобразования и обработки данных; существенно расширяются диапазоны измеряемых величин; в измерительных приборах широко применяется микроэлектроника; возникла необходимость в оценке характеристик случайных процессов. Все это требует нового подхода к уровню подготовки современных специалистов, к оценке состояния средств радиоизмерений и соответствия метрологических свойств приборов установленным нормам.

Для решения задач обучения студенты радиотехнических и телекоммуникационных специальностей, начиная уже с первого семестра, выполняют лабораторные работы, в основе которых лежат измерения. Результаты любых измерений, как бы тщательно они ни проводились, неизбежно содержат погрешности, поэтому успешная работа студентов в лабораториях наряду с изучением средств и методов измерений и приобретением навыков предполагает также их знакомство с современными методами обработки полученных результатов, анализа и оценивания погрешностей.

С измерениями связана деятельность инженеров, занимающихся исследовательской работой, конструкторов, технологов и т.д. Инженер непременно должен иметь ясное представление о возможностях измерительной техники, чтобы обеспечить взаимозаменяемость изделий, устройств и узлов радиоэлектронной аппаратуры. Знание современных стандартов, правил, норм и требований в области измерений также обязательно для специалистов, занимающихся управлением и организацией производства.

Дисциплина «Метрология и радиоизмерения» основывается на знании высшей математики, физики, теории электромагнитного поля, радиотехнических цепей и сигналов и является базой для изучения таких дисциплин, как «Устройства формирования сигналов», «Устройства приема и обработки сигнала», «Радиотехнические системы» и др.

Основные задачи изучения дисциплины «Метрология и радиоизмерения»:

- ознакомление с методами обеспечения единства измерений и соответствующей нормативной документацией;
- изучение принципов действия, технических и метрологических характеристик средств измерений;
- изучение современных методов и приобретение навыков обработки результатов измерений, оценки погрешности измерений;
- овладение методами и средствами измерения параметров и характеристик цепей, сигналов при разработке, производстве и эксплуатации радиотехнических средств.

В результате усвоения материала дисциплины студент должен знать:

- терминологию;
- основы теории погрешностей измерений;
- методы обработки результатов измерений;
- способы нормирования и формы задания метрологических характеристик средств измерений;

- основные нормативные положения и законодательные акты в области метрологии;
- цели и методы сертификации;
- принципы, методы измерений радиотехнических величин и структурные схемы радиоизмерительных приборов;
- принципы построения и структуру автоматизированных средств измерений и контроля.

Настоящий курс лекций включает в себя все аспекты учебной программы по дисциплине «Метрология». Он может быть рекомендован студентам радиотехнических и телекоммуникационных специальностей, в частности: «Радиотехника», «Радиофизика и электроника», «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» и др.

## Лекция 1. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

### 1. Из истории развития метрологии в России

Потребность в измерениях появилась у людей с возникновением орудий производства и необходимостью количественной оценки материальных объектов. При этом вырабатывались определенные представления о размерах, формах, свойствах предметов и явлений, а также правила и способы их сопоставления.

На Руси единицами длины были пядь, локоть. Локоть как единица измерения применялась в древности во многих государствах (Вавилон, Египет). Естественно, размер локтя был различным.

Одной из основных мер длины в России долгое время была сажень (упоминается в летописях начала X в.). Размер ее также не был постоянен. Применялись простая, косая, казенная сажень и др. При Петре I по его указу русские меры длины были согласованы с английскими.

В 1835 г. Николай I в «Указе правительствующему Сенату» утвердил сажень в качестве основной меры длины в России, а за основную единицу массы был принят образцовый фунт – кубический дюйм воды при температуре 13,3° по Реомюру в вакууме (фунт равнялся 409,51241 г). В России использовались также аршин (0,7112 м) и верста (в разные времена ее размер был различным).

Для поддержания единства установленных мер существовали эталонные (образцовые) меры, которые находились в храмах и церквях.

В 1841 г. в соответствии с указом «О системе Российских мер и весов» при Петербургском монетном дворе было организовано *Депо образцовых мер и весов* – первое государственное поверочное учреждение. Его основные задачи – хранение эталонов, составление таблиц русских и иностранных мер, изготовление образцовых мер и рассылка последних в регионы страны. Поверка мер и весов на местах была вменена в обязанность городских дум, управ и казенных палат.

Важным этапом в развитии русской метрологии явилось подписание Россией Метрической конвенции 20 мая 1875 г. В этом же году была создана Международная организация мер и весов (МОМВ). Штаб-квартира этой организации – Франция, г. Севр.

В 1893 г. в Петербурге на базе Депо образцовых мер и весов была образована *Главная палата мер и весов*, которую до 1907 г. возглавлял великий русский ученый Д.И. Менделеев. В это время проводились глубокие метрологические исследования. В 1900 г. при *Московском окружном пробирном управлении* открылась *Поверочная палатка торговых мер и весов*.

В 1918 г. был принят декрет «О введении международной метрической системы мер и весов».

В 1930 г. произошло объединение метрологии и стандартизации. Была проведена большая работа по изучению состояния метрологической деятельности, организован ряд метрологических институтов.

В 1954 г. был образован *Комитет стандартов, мер и измерительных приборов* при Совете Министров СССР (Госстандарт СССР). В настоящее время управление метрологической службой России осуществляет Государственный комитет РФ по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт России).

В отличие от зарубежных стран управление метрологической службой в РФ централизовано и осуществляется в рамках единой сферы управления, включающей и стандартизацию. Руководство метрологией и метрологический надзор сохраняются в качестве важнейших функций государственного управления.

## **2. Основные понятия и слагаемые метрологии**

*Метрология* (от греч. «метро» – мера, «логос» – учение) – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности измерений.

Метрологию разделяют на три раздела: «Теоретическая метрология», «Прикладная (практическая) метрология» и «Законодательная метрология».

*К ключевым понятиям* законодательной метрологии относят: измерение; физическую величину; средство измерений; эталон и меру; рабочее и образцовое СИ (ОСИ); измерительный преобразователь и датчик; метод и алгоритм измерений; методику выполнения измерений; метрологическую аттестацию СИ; поверку СИ; испытания СИ, метрологический надзор; сертификация СИ, ГСИ и др.

*Измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерение физической величины включает совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу ФВ или воспроизводящего шкалу ФВ, заключающихся в сравнении измеряемой величины с ее единицей или шкалой с целью получения значения этой величины в форме, удобной для использования.

Найденные значения называют *результатом измерений*. Измерительная информация – информация о значениях измеряемых ФВ. Она может быть представлена в формах: *аналоговой, цифровой или панорамной* (в виде графиков). Сигнал измерительной информации – это сигнал, функционально связанный с измеряемой ФВ.

*Предмет метрологии* – извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессов, т. е. измерение свойств объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью.

*Важнейшая задача* метрологии – обеспечение единства измерений – решается при соблюдении двух условий: выражение результатов измерений в узаконенных единицах и установление допускаемых погрешностей результатов измерений и границ, за которые они не должны выходить при заданной вероятности. Погрешности измерений указываются в паспорте, ТУ и иной нормативной документации, касающейся средства измерения.

К *основным слагаемым метрологии* относят:

- общую теорию измерений;
- единицы физических величин и их системы;
- методы и средства измерений;
- методы определения точности измерений;
- основы обеспечения единства измерений;
- эталоны и образцовые средства измерений;
- методы передачи размеров единиц ФВ рабочим СИ от эталонов и ОСИ.

### **3. Объекты и области измерений**

Объектом измерений являются физические величины.

*Физической величиной* называется одно из свойств физического объекта (явления, процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, отличающееся при этом количественным значением.

Качественная характеристика физической величины определяется тем, какое свойство материального объекта или какую особенность материального мира эта величина отражает (твердость, надежность, прочность и т. п.). Для выражения количественного содержания свойства конкретного объекта употребляется понятие «размер физической величины», который устанавливается в процессе измерения.

Физические величины разделяют на *измеряемые* и *оцениваемые*. Измеряемые величины могут быть выражены количественно в установленных единицах измерения. Величины, для которых не может быть введена единица измерения, относятся к оцениваемым. Оценку величины проводят при помощи установленной шкалы.

Существуют различные подходы к классификации физических величин, например по видам явлений:

- вещественные, описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них;

- энергетические, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии;
- физические величины, характеризующие протекание процессов во времени.

В последние десятилетия кроме физических величин в прикладной метрологии начали использовать и так называемые *нефизические величины*. Это связано с применением термина «измерение» в экономике, информатике, управлении качеством.

*Область измерений* – совокупность измерений ФВ, свойственных какой-либо области науки и техники и выделяющихся своей спецификой. *Вид измерений* – часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин.

Принято различать следующие области и виды измерений.

1. Измерения геометрических величин: длин, отклонений формы поверхностей, параметров сложных поверхностей, углов.
2. Измерения механических величин: массы, силы, крутящих моментов, напряжений и деформаций, параметров движения, твердости.
3. Измерения параметров потока, расхода, уровня, объема веществ: массового и объемного расхода жидкостей в трубопроводах, расхода газов, вместимости, параметров открытых потоков, уровня жидкости.
4. Измерения давлений, вакуумные измерения: избыточного давления, абсолютного давления, переменного давления, вакуума.
5. Физико-химические измерения: вязкости, плотности, содержаний (концентрации) компонентов в твердых, жидких и газообразных веществах, влажности газов, твердых веществ, электрохимические измерения.
6. Теплофизические и температурные измерения.
7. Измерения времени и частоты: методы и средства воспроизведения и хранения единиц и шкал времени и частоты, измерения интервалов времени, измерения частоты периодических процессов, методы и средства передачи размеров единиц времени и частоты.
8. Измерения электрических и магнитных величин на постоянном и переменном токе: силы тока, количества электричества, электродвижущей силы, напряжения, мощности и энергии, угла сдвига фаз, электрического сопротивления, проводимости, емкости, индуктивности и добротности электрических цепей, параметров магнитных полей, магнитных характеристик материалов.

9. Радиоэлектронные измерения: интенсивности сигналов, параметров формы и спектра сигналов, параметров трактов с сосредоточенными и распределенными постоянными, свойств веществ и материалов радиотехническими методами; антенные измерения.

10. Измерения акустических величин: в воздушной среде и в газах, в водной среде, в твердых телах, аудиометрия и измерения уровня шума.

11. Оптические и оптико-физические измерения: световые, измерения оптических свойств материалов в видимой области спектра, энергетических параметров некогерентного оптического излучения, энергетических параметров пространственного распределения энергии и мощности непрерывного и импульсного лазерного и квазимонохроматического излучения, спектральных, частотных характеристик, поляризации лазерного излучения, параметров оптических элементов, оптических характеристик материалов, характеристик фотоматериалов и оптической плотности.

12. Измерения ионизирующих излучений и ядерных констант: дозиметрических характеристик ионизирующих излучений, спектральных характеристик ионизирующих излучений, активности радионуклидов, радиометрических характеристик ионизирующих излучений.

#### ***4. Способы и методы измерений***

По способу получения результата различают следующие измерения.

*Прямое измерение* – это измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных с учетом цены деления отсчетного устройства. Например, измерение напряжения вольтметром как произведение известной цены деления  $C$  на отсчет по шкале  $X$  ( $Y = CX$ ).

*Косвенное измерение* – это измерение, при котором искомое значение величины ( $Y$ ) находят на основании известной зависимости между величинами, получаемыми в результате прямых измерений  $Y = F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_4)$ . Например, измерение мощности по прямым измерениям тока и напряжения  $P = UI$ ; измерение коэффициента передачи усилителя  $K = 20 \cdot \lg(U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}})$ .

*Совокупные измерения* – это производимые одновременно прямые измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения находят решением системы уравнений. Например, нахождение сопротивлений отдельных резисторов по одному и по результатам прямых сравнений сопротивлений различных сочетаний резисторов.

*Совместное измерение* – это измерения разноименных величин для нахождения функциональных зависимостей между ними. Например, определение температурного коэффициента сопротивления резистора по данным прямых измерений его сопротивления при различных температурах.

*Контроль* – это испытание, в процессе которого определяется, находится ли значение измеряемой величины в установленных для нее пределах. Результат контроля – информация в виде «годен», «не годен». Контроль бывает *поэлементный* и *комплексный* (изделия в целом). *Активный контроль* предполагает воздействие на технологический процесс в ходе изготовления. *Пассивный контроль* только констатирует факт годности или брака изделия.

*Принцип измерения* – совокупность физических явлений, на которых основаны измерения (взаимодействия электрических зарядов, эффект Холла).

*Алгоритм измерения* – точная последовательность операций, обеспечивающая измерение физической величины.

*Метод измерений* – это совокупность приемов использования принципов и средств измерений; прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей (или шкалой) в соответствии с реализованным принципом измерений.

*Методика измерений* – детально намеченный распорядок измерений, регламентирующие методы, средства, алгоритмы, а также способы обработки результатов. Методика измерений должна включать:

- общие указания;
- методы и виды СИ, порядок подготовки и проведения измерений;
- методику обработки результатов.

Различают следующие варианты методов измерения.

*Метод непосредственной оценки* – значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству многозначной меры, на которую действует сигнал измерительной информации, например измерение электрического напряжения электромеханическим вольтметром. В этом случае сигнал с помощью электромагнитной системы воздействует на заранее проградуированную многозначную меру – спиральную пружинку, поворачивающую рамку, а стрелка вольтметра индицирует угол закручивания пружинки. Если применяется цифровой вольтметр, мерой может служить, например, стабилитрон с делителем напряжения.

*Метод противопоставления* – измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения (компаратор), с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами, например измерение массы на равноплечих весах.

*Дифференциальный метод* – на прибор сравнения воздействует разность измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, например сравнение меры длины с образцовой на компараторе.

*Нулевой метод* – результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения равен нулю.

*Метод замещения* – измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

*Метод совпадений* – разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения меток шкал или периодических сигналов, например измерение частоты вращения стробоскопом.

## **5. Средства измерительной техники**

*Средства измерительной техники* – обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений (средства измерений, измерительные преобразователи, измерительные принадлежности, измерительные устройства, средства поверки).

*Средство измерений* – техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу или шкалу ФВ, которые принимаются неизменными (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. В общем случае СИ включает в себя меру, измерительный преобразователь (преобразователи), устройства сравнения и (или) индикации. Часть перечисленных элементов (кроме меры) в конкретном СИ может отсутствовать. Эти же элементы могут выполняться в виде самостоятельных технических устройств. СИ применяются как для измерения значений искомой ФВ, так и для измерений значений других ФВ, влияние которых на результат измерения искомой ФВ необходимо учитывать.

*Измерительный преобразователь* – техническое средство, служащее для преобразования измеряемой величины в другую или в сигнал измерительной информации, удобный для обработки, хранения,

дальнейшего преобразования, индикации или передачи (но не подающийся непосредственному восприятию), и имеющее нормированные метрологические характеристики (МХ). Различают первичные преобразователи – первые в измерительной цепи, к которым подведена измеряемая величина; промежуточные; аналого-цифровые (АЦП); масштабные (измерительные трансформаторы, усилители).

Конструктивно обособленный первичный преобразователь называют *датчиком*.

*Мера физической величины* – СИ, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения ФВ одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Различают меры однозначные, воспроизводящие ФВ одного размера (гиря, конденсатор постоянной емкости); многозначные, воспроизводящие ряд одноименных величин различного размера (линейка с делениями, конденсатор переменной емкости); наборы мер – специально подобранные комплекты мер, применяемые не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных ФВ различного размера (набор измерительных конденсаторов или резисторов). Если набор мер конструктивно объединен в единое устройство, имеющее приспособления для их соединения в различных комбинациях, его называют *магазином мер*. Разновидностями мер являются *стандартные образцы*, служащие для воспроизведения единиц величин, характеризующих свойства или состав веществ и материалов.

*Измерительный прибор* – это средство измерений, предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия оператором, регистрации или принятия решения. ИП, как правило, имеет в своем составе меру. Различают ИП *аналоговые, цифровые, показывающие* (допускающие только визуальный отсчет показаний), *регистрирующие, самопишущие, печатающие, интегрирующие* (усредняющие), *суммирующие* (показания которых функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых по различным каналам), *сравнивающие* – для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно (обычно с мерой).

СИ могут быть функционально объединены в измерительные установки. Если в них включены ОСИ, их называют *поверочными установками*. Если СИ соединены между собой каналами связи и предназначены для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи, использования, такую совокупность называют *измерительной системой*.

*Измерительная установка* – совокупность функционально объединенных средств измерения (приборов, мер, преобразователей) и вспомогательных устройств, расположенная в одном месте и предназначенная для выработки измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия оператором.

*Измерительная система* – совокупность средств измерения и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в системах управления. Измерительные системы, включающие в себя системы автоматического контроля, технической диагностики, называются *информационно-измерительными системами* (ИИС).

*Измерительный комплекс* – совокупность измерительных устройств и средств переработки информации, предназначенная для исследования, измерения и контроля (при наличии ЭВМ называется ИВК). Измерительные комплексы, как правило, производят измерение разноименных величин.

При проведении измерений широко применяют *измерительные принадлежности*, служащие для обеспечения необходимых внешних условий: термостаты, барокамеры, экранирующие камеры, стабилизаторы питающих электросетей и т. п.

Средства поверки – обобщенное понятие, охватывающее эталоны, ОСИ, поверочные установки.

## **6. Метрологические характеристики СИ**

*Метрологические характеристики* (МХ) средств измерений – это характеристики, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений. Информация о назначении МХ приведена в документации на средства измерений (в ГОСТе, ТУ, паспорте). Метрологические характеристики, установленные нормативными документами, называют *нормируемыми*.

МХ СИ предназначены:

- для оценки технического уровня и качества средства измерения;
- уточнения результатов измерения и оценки погрешности.

*Статические характеристики* прибора справедливы для установившегося режима работы, *динамические* – учитывают переходные процессы (переходная характеристика, импульсная переходная характеристика, амплитудно-фазовая характеристика, амплитудно-частотная характеристика, передаточная функция).

При установлении совокупности нормируемых МХ для средств измерений конкретного вида необходимо использовать номенклатуру характеристик, регламентированных ГОСТ 8.009 – 84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений». В этом стандарте приведены рекомендации по выбору МХ для различных видов СИ и критерий рациональности основных составляющих погрешности. Все МХ можно разделить на две группы: определяющие область применения СИ и качество измерения.

Основные МХ первой группы, – диапазон измерений, порог чувствительности.

*Диапазон измерений* – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности. Значение величины, ограничивающее диапазон измерений снизу или сверху (слева и справа), называют соответственно нижним или верхним пределом измерений.

*Порог чувствительности* – наименьшее изменение измеряемой величины, которое вызывает заметное отклонение выходного сигнала. *Чувствительность* – отношение изменения сигнала на выходе СИ к вызывающему его отклонению измеряемой величины.

К МХ второй группы относят следующие свойства: точность, сходимос́ть и воспроизводимос́ть измерений.

*Точность* – свойство измерений, отражающее близос́ть их результатов к истинному значению измеряемой величины. Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям. В практике применения СИ наиболее широко используется такая характеристика, как класс точности.

*Класс точности СИ* – обобщенная характеристика, выражаемая пределами допускаемых погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Классы точности конкретного типа СИ устанавливаются в нормативных документах, которые определяют конкретные требования к метрологическим характеристикам, в совокупности отражающим уровень точности СИ данного класса.

Чаще всего класс точности соответствует приведенной погрешности СИ, отнесенной к конечному значению шкалы СИ (прибора) или к максимальному значению ФВ в диапазоне (поддиапазоне) измерений.

Точность и погрешность – понятия, во многом близкие друг к другу.

*Погрешность* измерения – отклонение результата измерения от истинного (или действительного) значения измеряемой физической величины. Она указывает границы неопределенности значения измеряемой физической величины, характеризует точность результатов измерений, проводимых данным средством.

Погрешность не следует путать с ошибкой измерений, связанной с субъективными обстоятельствами. Погрешности измерений обычно приводятся в технической документации на СИ или в нормативных документах.

*Правильность* – свойство измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в их результатах. Результаты измерений правильны, когда они не искажены систематическими погрешностями.

*Сходимость* – свойство измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях, одним и тем же СИ, одним и тем же оператором. Для методик выполнения измерений это одна из важнейших характеристик.

*Воспроизводимость* – свойство измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях: в различное время, в разных местах, разными методами и средствами измерений. В процедурах испытаний продукции воспроизводимость, как и сходимость – важнейшая характеристика.

*Основные характеристики средств измерений:*

- принцип действия СИ – физический принцип, положенный в основу построения СИ данного типа;
- нормируемые метрологические характеристики (НМХ) – комплекс МХ, устанавливаемых в нормативной технической документации (НТД) на СИ;
- функция преобразования – зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра входного сигнала;
- функция влияния – зависимость изменения МХ СИ от изменения влияющей величины или от изменения совокупности влияющих величин.

*Нормируемые метрологические характеристики СИ конкретного типа в соответствии с ГОСТ 8.009 – 84:*

- номинальное значение меры;
- номинальная статическая характеристика преобразователя;
- цена деления шкалы прибора или единица младшего разряда;
- входное сопротивление (емкость, индуктивность);
- значения погрешностей (основная и дополнительная погрешность прибора, класс точности);
- диапазон измерений;
- чувствительность (порог чувствительности);

- время установления показаний;
- быстродействие (число измерений в единицу времени);
- потребляемая мощность;
- наработка на отказ (среднее время непрерывной работы до первого ремонта для заданной группы приборов).

### ***Контрольные вопросы***

1. В каком веке в России было организовано первое государственное поверочное учреждение и как оно называлось?
2. Какой орган осуществляет управление метрологической службой России?
3. Что такое метрология?
4. Что такое измерение?
5. Назовите области и виды измерений, которые имеют прямое отношение к вашей специальности.
6. Приведите определение и примеры прямых измерений.
7. Приведите определение и примеры косвенных измерений.
8. Приведите определение и примеры совместных измерений.
9. Что такое контроль и что является его результатом?
10. Что такое принцип измерения?
11. Что такое алгоритм измерения?
12. Что такое метод измерений?
13. Что такое методика измерений?
14. Что охватывает понятие «средство измерений»?
15. Что называют датчиком?
16. Что такое мера физической величины?
17. Что такое измерительный прибор?
18. Что такое измерительная установка?
19. Что такое метрологические характеристики СИ? Назовите их.

## **Лекция 2. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

### ***1. Законодательные основы ГСИ***

Государственная система обеспечения единства измерений – комплекс установленных стандартами взаимоувязанных правил, положений, требований и норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений.

Главный законодательный акт, обеспечивающий единство измерений, – Закон РФ «Об обеспечении единства измерений», который определяет:

- основные метрологические понятия (термины и определения);
- компетенцию Госстандарта России в обеспечении единства измерений;
- единицы величин, государственные эталоны, средства и методики измерений;
- компетенцию и структуру Государственной метрологической службы и других государственных служб обеспечения единства измерений;
- метрологические службы государственных органов управления, предприятий и организаций;
- сферы распространения и виды государственного метрологического контроля и надзора;
- права, обязанности и ответственность государственных инспекторов по обеспечению единства измерений;
- условия использования средств измерений в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора;
- требования к выполнению измерений по аттестованным методикам;
- основные положения калибровки и сертификации средств измерений;
- лицензирование деятельности организаций и физических лиц по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений;
- источники финансирования работ по обеспечению единства измерений;
- ответственность за нарушение положений Закона.

В целях реализации положений Закона «Об обеспечении единства измерений» выпущены Постановление Правительства РФ «Об организации работ по стандартизации, обеспечению единства измерений, сертификации продукции и услуг» (№ 100 от 12 февраля 1994 г. с изменениями от 12 января 1996 г.) и ряд подзаконных актов. Кроме того, в стране действует система межгосударственных (ГОСТ) и государственных стандартов РФ (ГОСТ Р), большое число нормативных документов, правил и рекомендаций, регламентирующих метрологические требования, положения и нормы, а также организацию и порядок проведения работ по обеспечению единства измерений в стране.

Совокупность нормативных документов, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единства измерений в РФ при требуемой точности, составляет *Государственную систему обеспечения единства измерений*.

Стандарты ГСИ (ГОСТ, ГОСТ Р) регламентируют общие правила и требования в области метрологии (организацию и порядок проведения государственных испытаний и поверки; классификацию и процедуру создания эталонов и поверочных схем; требования к разработке методик поверки, измерений, метрологической аттестации; способы нормирования метрологических характеристик). Свыше 150 государственных стандартов устанавливают требования к метрологическим характеристикам, составу государственных эталонов и структуре возглавляемых ими поверочных схем.

Наибольшую долю в массиве метрологических документов составляют нормативные документы на методики поверки. В них регламентированы средства и методы поверки, алгоритмы ее проведения, обработки результатов измерений, оформления результатов поверки и т. д. Таких нормативных документов – порядка 900. Более 100 документов определяют методики выполнения измерений (методики измерений), метрологической аттестации и разрешают другие вопросы метрологической деятельности.

## ***2. Терминология и деятельность по ОЕИ***

Детальная структура, основные положения и термины ГСИ представлены в ГОСТ Р 8.000 – 2000.

*Единство измерений* – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

*Обеспечение единства измерений* – деятельность, направленная на установление и применение научных, правовых, организационных и технических основ, правил, норм и средств, необходимых для достижения заданного уровня единства измерений.

*Система обеспечения единства измерений* – совокупность субъектов, норм, средств и видов деятельности, достаточная для обеспечения заданного уровня единства измерений.

*Государственная система обеспечения единства измерений* – система управления субъектами, нормами, средствами и видами деятельности по обеспечению заданного уровня единства измерений в Российской Федерации.

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

*Государственная метрологическая служба* – метрологическая служба, выполняющая работы по обеспечению единства измерений в масштабах страны.

*Метрологическая служба федерального органа исполнительной власти* – метрологическая служба, выполняющая работы по обеспечению единства измерений в пределах установленной ответственности этого органа.

*Метрологическая служба юридического лица* – метрологическая служба, выполняющая работы по обеспечению единства измерений на предприятии.

*Поверка средства измерений* (не путать со словом «проверка») – совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (или другими уполномоченными органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия СИ установленным техническим требованиям. *Поверка СИ* – установление пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и контроля их соответствия установленным требованиям. Различают государственную и ведомственную поверку, а также первичную – при выпуске СИ из производства, после ремонта, при ввозе из-за границы партиями – и периодическую, проводимую через установленные межповерочные интервалы.

Деятельность по ОЕИ направлена на охрану прав и законных интересов граждан, установленного правопорядка и экономики, а также на содействие экономическому и социальному развитию страны, защиту от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений во всех сферах жизни общества посредством конституционных норм, законов, постановлений Правительства Российской Федерации и НД.

Деятельности по ОЕИ ведется в соответствии:

- с Конституцией Российской Федерации;
- Законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений»;
- Постановлением Правительства Российской Федерации от 12.02.94 № 100 «Об организации работ по стандартизации, обеспечению единства измерений, сертификации продукции и услуг»;
- стандартами и другими НД ГСИ, принимаемыми Госстандартом России.

ОЕИ в стране осуществляется:

- на государственном уровне;
- уровне федеральных органов исполнительной власти;
- уровне юридического лица.

Управляет деятельностью по ОЕИ Государственный комитет РФ по стандартизации и метрологии.

ОЕИ в пределах установленной ответственности федерального органа исполнительной власти осуществляет его метрологическая служба.

Единство измерений в пределах установленной области деятельности юридического лица осуществляет метрологическая служба предприятия (организации) или иная служба, выполняющая ее функции.

ГСИ состоит из следующих подсистем: правовой; технической; организационной.

Нормы, правила, положения и требования ГСИ взаимоувязаны с нормами, правилами, положениями и требованиями Государственной системы стандартизации и других систем.

### ***3. Цель и задачи ГСИ***

*Цель ГСИ* – создание общегосударственных правовых, нормативных, организационных, технических и экономических условий для решения задач по ОЕИ и предоставление возможности всем субъектам деятельности оценивать правильность выполняемых измерений и уровень их влияния на результаты деятельности, основанной на итогах измерений.

*Основные задачи ГСИ:*

- разработка оптимальных принципов управления деятельностью по ОЕИ;

- организация и проведение фундаментальных научных исследований с целью создания более совершенных и точных методов и средств воспроизведения единиц и передачи их размеров;

- установление системы единиц величин и шкал измерений, допускаемых к применению;

- выработка понятий метрологии, унификация их терминов и определений;

- установление рациональной системы государственных эталонов;

- создание, утверждение, применение и совершенствование государственных эталонов;

- установление систем передачи размеров единиц величин от государственных эталонов средствам измерений, применяемым в стране;

- создание и совершенствование вторичных и рабочих эталонов, комплектных поверочных установок и лабораторий;

- установление метрологических требований к эталонам, средствам измерений, методикам выполнения измерений, методикам поверки (калибровки) средств измерений и других требований, соблюдение которых – необходимое условие ОЕИ;

- разработка и экспертиза разделов метрологического обеспечения федеральных и иных государственных программ, в том числе программ создания и развития производства оборонной техники;

- осуществление государственного метрологического контроля;

- поверка средств измерений;

- испытания с целью утверждения типа средств измерений; лицензирование деятельности юридических и физических лиц по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений;

- осуществление государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений; эталонами единиц величин; аттестованными методиками выполнения измерений; соблюдением метрологических правил и норм; количеством товаров, отчуждаемых при совершении торговых операций, количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже;

- разработка принципов оптимизации материально-технической и кадровой базы органов Государственной метрологической службы;

- аттестация методик выполнения измерений;

- калибровка и сертификация средств измерений, не входящих в сферы государственного метрологического контроля и надзора;

- аккредитация метрологических служб и иных юридических или физических лиц по различным видам метрологической деятельности;

- аккредитация поверочных, калибровочных, измерительных, испытательных и аналитических лабораторий, лабораторий неразрушающего и радиационного контроля в составе действующих в Российской Федерации систем аккредитации;

- участие в работе международных организаций, деятельность которых связана с ОЕИ;

- разработка совместно с уполномоченными федеральными органами исполнительной власти порядка определения стоимости (цены) метрологических работ и регулирование тарифов на эти работы;

- организация подготовки и подготовка метрологов;

- информационное обеспечение по вопросам ОЕИ;

- совершенствование и развитие ГСИ.

#### **4. Подсистемы ГСИ**

##### **Правовая подсистема**

Правовая подсистема – комплекс взаимосвязанных законодательных и подзаконных актов (в том числе межотраслевых НД ГСИ), объединенных общей целевой направленностью и устанавливающих согласованные требования к следующим взаимосвязанным объектам деятельности по ОЕИ:

- совокупности узаконенных единиц величин и шкал измерений;
- терминологии в области метрологии;
- воспроизведению и передаче размеров единиц величин и шкал измерений;
- способам и формам представления результатов измерений и характеристик их погрешности;
- методам оценивания погрешности и неопределенности измерений;
- порядку разработки и аттестации методик выполнения измерений;
- комплексам нормируемых метрологических характеристик СИ;
- методам установления и корректировки межповерочных (рекомендуемых межкалибровочных) интервалов;
- порядку проведения испытаний в целях утверждения типа средств измерений и сертификации средств измерений;
- порядку проведения поверки и калибровки средств измерений;
- порядку осуществления метрологического контроля и надзора;
- порядку лицензирования деятельности юридических и физических лиц по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений;
- типовым задачам, правам и обязанностям метрологических служб федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц;
- порядку аккредитации метрологических служб по различным направлениям метрологической деятельности;
- порядку аккредитации поверочных, калибровочных, измерительных, испытательных и аналитических лабораторий, лабораторий неразрушающего и радиационного контроля;
- терминам и определениям по видам измерений;
- государственным поверочным схемам;
- методикам поверки (калибровки) средств измерений;
- методикам выполнения измерений.

Нормативные документы по обеспечению единства измерений: государственные стандарты, международные (региональные) стандарты, правила и рекомендации по метрологии – принимает и вводит в действие Госстандарт России в порядке, установленном Государственной системой стандартизации Российской Федерации. Допускается применение иных НД по ОЕИ, разрабатываемых и принимаемых в порядке, устанавливаемом Госстандартом России.

### **Техническая подсистема**

Техническую подсистему ГСИ составляют:

- совокупность межгосударственных, государственных эталонов и эталонов единиц величин и шкал измерений;
- совокупность военных эталонов (резерв государственных эталонов);
- совокупность стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов;
- совокупность стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;
- средства измерений и испытательное оборудование, необходимое для осуществления метрологического контроля и надзора;
- совокупность специальных зданий и сооружений для проведения высокоточных измерений в метрологических целях;
- совокупность научно-исследовательских, эталонных, испытательных, поверочных, калибровочных и измерительных лабораторий (в том числе передвижных) и их оборудования.

*Технической основой* ГСИ также являются:

- 1) система передачи размеров единиц и шкал физических величин от эталонов ко всем СИ с помощью ОСИ и других средств поверки;
- 2) система разработки, постановки на производство и выпуска в обращение рабочих СИ, обеспечивающих исследования, разработку, определение характеристик продукции, технологических процессов и других объектов;
- 3) система обязательных государственных испытаний СИ, предназначенных для серийного или массового производства и ввозимых из-за границы партиями;
- 4) система государственной и ведомственной метрологической аттестации и поверки СИ.

## **Организационная подсистема**

Организационную подсистему ГСИ составляют следующие службы:

- Государственная метрологическая служба;
- иные государственные службы ОЕИ;
- метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц (в том числе метрологическая служба Вооруженных Сил РФ, осуществляющая деятельности по ОЕИ в сфере обороны и безопасности).

В Государственную метрологическую службу входят:

- подразделения центрального аппарата Госстандарта России, осуществляющие функции планирования, управления и контроля деятельности по ОЕИ на межотраслевом уровне;
- государственные научные метрологические центры;
- органы Государственной метрологической службы на территориях республик РФ, краев, областей, округов и городов.

К иным государственным службам ОЕИ относят:

- Государственную службу времени, частоты и определения параметров вращения Земли;
- Государственную службу стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов;
- Государственную службу стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

Функции, структуру, права и обязанности метрологических служб и иных служб ОЕИ устанавливают законодательными и подзаконными актами, в том числе межотраслевыми НД, а также положениями об этих службах.

### ***5. Основы метрологического обеспечения***

Под метрологическим обеспечением понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Метрологическое обеспечение базируется на четырех основах: научной, организационной, технической и нормативной.

*Научная основа* метрологического обеспечения – метрология как наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

*Организационная основа* метрологического обеспечения – Государственная метрологическая служба России, метрологические службы федеральных органов управления и юридических лиц. Государственное управление деятельностью по обеспечению единства измерений в РФ осуществляет Госстандарт России.

*Техническая основа* метрологического обеспечения – система государственных эталонов единиц физических величин; система передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем средствам измерений; система разработки, постановки на производство и выпуска в обращение рабочих средств измерений; система государственных испытаний средств измерений; система государственной и ведомственной поверки средств измерений; система стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

*Нормативная основа* обеспечения единства измерений - законодательная метрология: Закон РФ «Об обеспечении единства измерений», стандарты, правила, рекомендации и другие нормативные документы.

### ***6. Государственное управление деятельностью по ОЕИ***

Федеральный орган государственной власти, осуществляющий государственное управление деятельностью по обеспечению единства измерений в РФ, – Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации и метрологии (Госстандарт России).

Госстандарт осуществляет свою деятельность непосредственно и через находящиеся в его ведении территориальные центры стандартизации, метрологии и сертификации, а также через государственных инспекторов по надзору за государственными стандартами и обеспечению единства измерений.

В ведении Госстандарта России находятся:

- Государственная метрологическая служба;
- Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли;
- Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов;
- Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

*Стандартный образец вещества или материала (СО)* – мера, предназначенная для воспроизведения специфической величины (величин) из числа характеризующих состав, свойства и (или) технические параметры веществ (материалов), или значения неспецифической величины (величин), для измерения которых необходимо учитывать особенности данного вещества (материала).

*Справочные данные (СД)* – данные о физических константах и свойствах веществ и материалов, основанные на исследованиях и высокоточных измерениях. В зависимости от достоверности СД различают: стандартные справочные данные (ССД), рекомендуемые справочные данные (РСД) и информационные данные (ИД). ССД – числовые значения физических констант и свойств важнейших материалов и веществ, полученные на основе анализа и оценки достоверности всей имеющейся совокупности воспроизводимых результатов измерений и (или) расчетов, аттестованные в ГСССД и утвержденные Госстандартом. Допустимые значения достоверности ССД должны соответствовать достигнутому уровню измерительной техники и научно-технических знаний в данной области. РСД – числовые значения физических констант и свойств материалов и веществ, полученные на основе оценки погрешности результатов измерений и (или) расчетов, аттестованные в ГСССД и утвержденные ВНИЦ МВ Госстандарта. Допускаемая погрешность РСД должна удовлетворять задачам, для решения которых рекомендуются эти данные, с учетом требований стандартов ГСИ. ИД – совокупность фактографических сведений о номенклатуре, свойствах и технических характеристиках производства и применения материалов и веществ.

В соответствии с законодательством РФ и «Положением о Государственном комитете Российской Федерации по стандартизации и метрологии» Госстандарт отвечает за решение следующих основных задач:

- выработку и реализацию государственной политики в сфере стандартизации, метрологии и сертификации, установление и использование стандартов, эталонов и единиц величин и исчисления времени;
- осуществление мер по защите прав потребителей и интересов государства в области контроля за соблюдением требований безопасности товаров, работ, услуг;

- обеспечение функционирования и развития систем стандартизации, обеспечение единства измерений, сертификации, а также их гармонизации с международными и национальными системами зарубежных стран;

- организацию и проведение государственного контроля и надзора за соблюдением обязательных требований государственных стандартов, правил обязательной сертификации, за сертифицированной продукцией, а также государственного метрологического контроля и надзора;

- формирование совместно с федеральными органами исполнительной власти федеральных информационных ресурсов и инфраструктуры стандартизации, метрологии и сертификации, аккредитации, качества и классификации технико-экономической информации.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое ГСИ?
2. Что такое единство измерений?
3. Какой закон обеспечивает единство измерений в стране?
4. Назовите уровни метрологических служб в РФ.
5. Что такое поверка средства измерений?
6. Назовите виды поверки.
7. На каких уровнях осуществляется деятельность по ОЕИ?
8. Из каких подсистем состоит ГСИ?
9. Что собой представляет правовая подсистема ГСИ?
10. Что входит в структуру нормативных документов по ОЕИ?
11. Что собой представляет техническая подсистема ГСИ?
12. Что собой представляет организационная подсистема ГСИ?
13. Назовите наиболее важные на ваш взгляд задачи ГСИ.
14. Какие подразделения входят в Государственную метрологическую службу?
15. На каких четырех основах базируется метрологическое обеспечение?
16. Какой орган власти осуществляет государственное управление деятельностью по ОЕИ в РФ?

### **Лекция 3. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА**

#### ***1. Государственная метрологическая служба***

Метрологическая служба – сеть организаций Госстандарта и других министерств и ведомств, ответственных за достижение и поддержание единства измерений в стране. Она возглавляется ВНИИМС. В нее входят метрологические НИИ и НПО – центры государственных эталонов, Государственная служба времени и частоты, Государственная служба стандартных образцов, Государственная служба стандартных справочных данных (ГСССД), органы государственной метрологической службы в субъектах РФ, ведомственные метрологические службы.

Государственная метрологическая служба несет ответственность за метрологическое обеспечение в стране на межотраслевом уровне и осуществляет государственный контроль и надзор.

Особенность правового положения ГМС – подчиненность ее по вертикали Госстандарту России, в рамках которого она существует обособленно и автономно.

В состав ГМС входят: государственные научные метрологические центры (ГНМЦ); органы Государственной метрологической службы на территориях республик, автономной области, автономных округов, областей, городов Москвы и Санкт-Петербурга.

Государственные научные метрологические центры (их семь) представлены такими институтами, как Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (Москва), научно-производственное объединение «ВНИИ метрологии имени Д.И. Менделеева» (ВНИИМ, Санкт-Петербург), научно-производственное объединение «ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ, Московская область), Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ, Новосибирск), Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ, Екатеринбург), Всероссийский научно-исследовательский институт расходометрии (ВНИИР, Казань), Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВС НИИФТРИ, Иркутск).

ГНМЦ являются хранителями государственных эталонов, проводят исследования в области теории измерений, применения принципов и методов высокоточных измерений, разработки научно-методических основ совершенствования Российской системы измерений, разрабатывают нормативные документы по обеспечению единства измерений.

В состав Государственной метрологической службы входят свыше 100 *региональных центров стандартизации, метрологии и сертификации* (ЦСМиС), расположенных на всей территории РФ.

Основные функции ЦСМиС:

- государственный метрологический контроль и надзор за обеспечением единства измерений в регионе;
- метрологическое обеспечение предприятий и организаций;
- поверка и калибровка средств измерений;
- аккредитация поверочных и калибровочных лабораторий;
- обучение и аттестация поверителей;
- разработка новых средств измерений;
- техническое обслуживание и ремонт средств измерений.

Деятельность ГНМЦ регламентируется Постановлением Правительства Российской Федерации от 12.02.94 № 100.

## ***2. Государственные службы по ОЕИ***

К числу государственных служб, обеспечивающих единство измерений, кроме Государственной метрологической службы относятся также Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли, Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

ГСВЧ – это сеть организаций, осуществляющих межрегиональную и межотраслевую координацию работ по обеспечению единства измерений времени, частоты и определения параметров вращения Земли, а также воспроизведение, хранение и передачу размеров единиц времени и частоты, шкал атомного, всемирного и координированного времени, координат полюсов Земли. Измерительную информацию ГСВЧ используют службы навигации и управления судами, самолетами и спутниками, Единая энергетическая система России и др. В состав ГСВЧ входит ряд метрологических НИИ и НПО Госстандарта СССР, астрономические обсерватории и другие организации. Возглавляет работу Главный метрологический центр ГСВЧ, входящий в состав НПО «ВНИИФТРИ». В ГСВЧ находится государственный первичный эталон единиц времени и частоты.

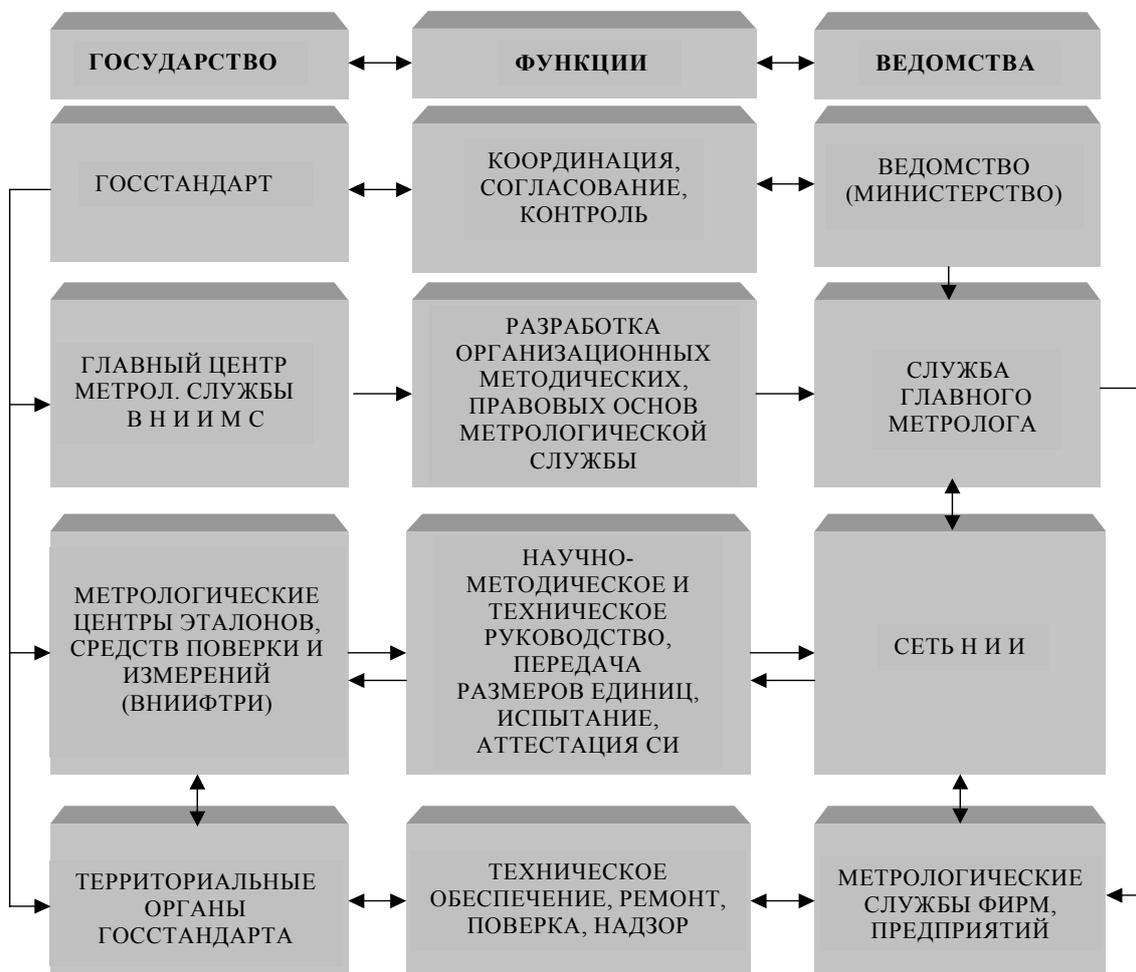
ГССО – это возглавляемая ВНИИМСО сеть организаций различных министерств и ведомств. ГССО организует создание и контролирует применение стандартных образцов металлов и сплавов, медицинских препаратов, нефтепродуктов, минерального сырья, почв

и т. п. Служба обеспечивает разработку средств сопоставления характеристик стандартных образцов с характеристиками веществ и материалов, которые производят промышленные, сельскохозяйственные и другие предприятия, для их идентификации или контроля.

ГСССД – это сеть организаций различных министерств и ведомств, несущих ответственность за получение и информационное обеспечение народного хозяйства ССД. Служба обеспечивает разработку достоверных данных о физических константах, свойствах веществ и материалов. Возглавляет ГСССД ВНИЦ МВ (НПО «Элтест»).

*Метрологические службы федеральных органов управления* создаются в министерствах (комитетах, ведомствах) в целях выполнения работ по обеспечению единства и требуемой точности измерений, проведения метрологического контроля и надзора.

Структура взаимодействия в рамках ГСИ показана на рисунке.



Метрологические службы организованы в Минздраве, Минатоме, Минприроде, Миноборонпроме и других федеральных органах исполнительной власти. Такие службы функционируют в РАО ЕЭС

России, РАО «Газпром» и других организациях. Метрологические службы федеральных органов управления и юридических лиц осуществляют свою деятельность в соответствии с Законом РФ «Об обеспечении единства измерений». Основные цели, задачи, права и обязанности метрологических служб государственных органов управления определены правилами по метрологии ПР 50.732 – 93 «Государственная система измерений. Типовое положение о метрологической службе государственных органов управления и юридических лиц». Права и обязанности метрологических служб определяются Положением о службе, утверждаемой руководителем министерства (комитета, ведомства).

К основным задачам метрологических служб федеральных органов управления относят:

- надзор за состоянием и применением средств измерений, за аттестованными методиками выполнения измерений, за соблюдением метрологических правил и норм, нормативных документов по обеспечению единства измерений;

- калибровку средств измерений;

- проверку своевременности представления средств измерений на испытания в целях утверждения типа средств измерений, а также на поверку и калибровку;

- выдачу обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических правил и норм;

- анализ состояния измерений, испытаний и контроля на предприятии, в организации.

Метрологическая служба федерального органа управления представляет собой систему, образуемую его руководителем. Служба может включать в себя:

- структурное подразделение главного метролога в центральном аппарате федерального органа;

- головные и базовые организации метрологической службы в отраслях и подотраслях, назначаемые органом управления;

- метрологические службы предприятий, объединений и организаций (юридических лиц).

*Метрологические службы юридических лиц* (предприятий, организаций) относятся к числу основных звеньев метрологической службы федеральных органов управления (министерств, комитетов, ведомств).

Задачи, права и обязанности МС юридических лиц любой формы собственности изложены в правилах по метрологии ПР 50/732 – 93.

Изложим подробнее представление о структуре, основных задачах и обязанностях МС юридического лица на примере промышленного предприятия.

На крупном промышленном предприятии приказом руководства формируется самостоятельное структурное подразделение (отдел, бюро), возглавляемое главным метрологом предприятия, подчиняющимся непосредственно главному инженеру (техническому директору). В службе главного метролога рекомендуется организовать следующие подразделения: комплексные (или по видам измерений) метрологические лаборатории, бюро подготовки и лабораторию организации метрологического обеспечения.

Структура и штат МС утверждаются руководством предприятия исходя из специфики производства и объема работ, возлагаемого на метрологическую службу. Основные задачи МС предприятия:

- обеспечение единства измерений, повышение уровня и совершенствование техники измерений, испытаний и контроля на предприятии;
- организация и проведение работ по подготовке и совершенствованию метрологического обеспечения во всех областях деятельности предприятия;
- определение необходимой номенклатуры и планомерное внедрение средств и методик выполнения измерений, испытаний и контроля, отвечающих современным требованиям и обеспечивающих повышение эффективности научных исследований, проектных, конструкторских и экспериментальных работ, поддержание заданных режимов технологических процессов, объективный контроль качества продукции, контроль соблюдения безопасных условий труда, учет и рациональное использование материальных и энергетических ресурсов.

Метрологическая служба осуществляет свою работу под методическим руководством базовой организации метрологической службы министерства, в тесном взаимодействии со службами стандартизации, надежности и сертификации продукции предприятия.

На МС предприятия возлагаются следующие обязанности:

- проведение анализа состояния метрологического обеспечения производства, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- разработка, согласование и внедрение стандартов и других нормативных документов по вопросам метрологического обеспечения;

- организация и участие в проведении метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации, разрабатываемой на предприятии;
- разработка для нужд предприятия совместно с другими подразделениями СИ, их испытания и контроль;
- участие в проведении испытаний продукции и подготовке ее к сертификации;
- участие в разработке и внедрении локальных поверочных схем, поддержание в надлежащем состоянии эталонных СИ и организация своевременной поверки рабочих СИ;
- организация и проведение ремонта СИ, изучение их эксплуатационных свойств;
- участие в обеспечении подразделений предприятия СИ, стандартными образцами состава и свойств веществ и материалов, ведение учета СИ;
- организация обучения по повышению квалификации работников предприятия, связанных с выполнением измерений;
- предъявление руководителям подразделений предписаний об устранении выявленных нарушений метрологических правил, требований и норм, об изъятии из применения непригодных СИ.

На небольших предприятиях при малых объемах работ Госстандарт России рекомендует вместо организации метрологических служб назначать лиц, ответственных за обеспечение единства измерений. Для ответственных лиц (инженеров-метрологов) утверждается должностная инструкция, в которой оговариваются их функции, права, обязанности и ответственность.

### ***3. Метрологическое обеспечение подготовки производства на предприятии***

Работы по метрологическому обеспечению подготовки производства начинаются с момента получения исходных документов на разработку новых изделий (освоение новой услуги) и выполняются всеми службами (конструкторскими, технологическими, метрологическими и др.) предприятий, осваивающих их производство. В результате выполнения этих работ должна быть создана нормативная база для определения с требуемой точностью и контроля с заданной достоверностью характеристик материалов, деталей, узлов и изделий, технологических процессов, оснастки и оборудования, необходимых для производства и выпуска продукции (выполнения услуги).

Работы по метрологическому обеспечению подготовки производства включают в себя:

- установление рациональной (минимально достаточной) номенклатуры измеряемых и контролируемых параметров и норм точности измерений, обеспечивающих эффективное ведение технологических процессов, достоверную оценку и контроль показателей качества изделий на всех этапах их изготовления, приемки и выпуска из производства при минимальных экономических затратах;

- разработку, аттестацию (в соответствии с ГОСТ Р 8.563 – 96 «ГСИ. Методики выполнения измерений») и внедрение методик выполнения измерений и контроля, обеспечивающих установленные требования к точности результатов измерений и достоверности результатов контроля показателей качества изделий;

- выбор стандартизованных и разработку нестандартизованных (специального назначения) СИ;

- создание системы метрологического обслуживания используемых на производстве СИ;

- подготовку работников соответствующих служб и производственных подразделений предприятия к выполнению контрольно-измерительных операций;

- разработку нормативно-технических документов, регламентирующих правила выполнения каждого из указанных этапов работ по метрологическому обеспечению подготовки производства.

При выборе средств измерений основными метрологическими характеристиками СИ считаются диапазон измерений, точность измерений, трудоемкость и стоимость контроля качества объекта измерения.

Точность СИ должна быть достаточно высокой по сравнению с заданной, а трудоемкость измерений и их стоимость должны быть возможно более низкими, обеспечивающими экономичность процесса измерения.

Излишняя точность измерений ведет к повышению трудоемкости и стоимости измерений, а недостаточная – нередко приводит к тому, что часть годной продукции при контроле качества может быть забракована и, наоборот, фактически негодная продукция может быть принята на контроле как годная.

#### ***4. Метрологическая экспертиза***

*Метрологическая экспертиза (МЭ)* – анализ и оценивание оптимальности технических решений в части реализации метрологических требований, правил и норм, в первую очередь связанных с единством и точностью измерений. Различают МЭ документации и объектов.

Метрологической экспертизе подвергают техническую документацию (техническое задание, конструкторскую и технологическую документацию, документацию систем обеспечения качества и др.), различные приборы и технологическое оборудование.

Цель проведения экспертизы – оценка экспертами-метрологами правильности применения требований, правил, норм, обеспечивающих единство и точность измерений, а также обеспечение эффективности использования контрольно-измерительного оборудования.

В процессе проведения экспертизы решают следующие задачи:

- определяют оптимальную номенклатуру измеряемых и контролируемых параметров продукции и процессов;
- устанавливают соответствие показателей точности измерения требованиям эффективности и достоверности контроля и испытаний, а также обеспечения оптимальных режимов технологических процессов;
- проводят оценку контроля пригодности продукции и процессов;
- проводят выбор методов и средств измерений, обеспечивающих необходимое качество измерений при испытаниях или контроле;
- выявляют возможность применения унифицированных и стандартных средств измерений и аттестованных методик выполнения измерений;
- при необходимости разрабатывают и аттестуют методики выполнения измерений;
- устанавливают правильность обозначений физических величин и их единиц согласно принятым единицам физических величин.

Метрологическую экспертизу проводят подразделения метрологической службы предприятий и организаций в соответствии с действующими рекомендациями (МИ 1314-86, МИ 2267-2000, МИ 2177-91).

#### ***5. Понятие о государственном метрологическом надзоре и контроле***

*Метрологический контроль и надзор* – деятельность, осуществляемая органами государственного контроля и надзора или аккредитованной метрологической службой юридического лица с целью проверки соблюдения пользователями СИ Закона «Об обеспечении единства измерений», требований государственных стандартов и других нормативных документов в области метрологии.

Метрологические службы юридических лиц осуществляют метрологический контроль и надзор:

- путем калибровки средств измерений;
- оценки состояния и применения СИ, аттестованных методик выполнения измерений, эталонов единиц величин, применяемых для калибровки СИ, соблюдения метрологических правил и норм, нормативных документов по обеспечению единства измерений;
- выдачи обязательных предписаний с целью устранения нарушений метрологических правил и норм;
- проверки своевременности представления СИ на испытание в целях утверждения типа, а также на поверку и калибровку.

В соответствии с Законом «Об обеспечении единства измерений» (ст. 13) *государственному контролю и надзору подвергаются* СИ, методики выполнения измерений, количество товаров, фасованных в упаковки любого вида, и другие объекты в следующих сферах деятельности:

- здравоохранение, ветеринария, охрана окружающей среды, обеспечение безопасности;
- торговые операции и взаимные расчеты между покупателем и продавцом, в том числе операции с применением игровых автоматов и устройств;
- государственные учетные операции;
- обеспечение обороны государства;
- геодезические и гидрометеорологические работы;
- банковские, налоговые, таможенные и почтовые операции;
- продукция, поставляемая по государственным контрактам в соответствии с Законом РФ «О поставках продукции и товаров для государственных нужд»;
- испытания и контроль качества продукции на соответствие обязательным требованиям государственных стандартов РФ и при обязательной сертификации продукции;
- измерения, проводимые по поручению органов прокуратуры, арбитража, других органов государственного управления;
- регистрация национальных и международных спортивных рекордов.

*Государственный метрологический контроль включает:*

- утверждение типа средств измерений;
- поверку средств измерений, в том числе эталонов;
- лицензирование деятельности юридических и физических лиц по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений.

*Государственный метрологический надзор осуществляется:*

- за выпуском, состоянием и применением СИ, аттестованными методиками измерений, эталонами единиц величин, соблюдением метрологических правил и норм на предприятиях, деятельность которых относится к сферам, определенным ст. 13 указанного выше Закона;
- количеством товаров, отчуждаемых при совершении торговых операций;
- количеством фасованных товаров в упаковке любого вида при их расфасовке и продаже.

Проверки проводят должностные лица Госстандарта России – главные государственные инспекторы и государственные территориальные инспекторы по обеспечению единства измерений.

### ***6. Владимирский ЦСМ (ВЦСМ)***

ВЦСМ выполняет функции государственного надзора за стандартами, СИ, единицами физических величин, соблюдением метрологических правил и норм, а также испытанием и сертификацией продукции, работ и услуг на предприятиях, в организациях и учреждениях области. Он подчиняется Госстандарту России, взаимодействует с другими метрологическими центрами России и институтами Госстандарта, а также метрологическими службами министерств, ведомств, юридических лиц, муниципальных органов самоуправления.

ВЦСМ руководит технической подготовкой в области метрологии, отвечает за единство измерений во Владимирской области, входит (председателем) в областной Совет метрологов. ВЦСМ осуществляет обучение и аттестацию специалистов-метрологов юридических лиц области, формирует планы и отчеты перед вышестоящими организациями. Под руководством ВЦСМ находятся отделы метрологии г. Владимира, Кольчугинского, Муромского, Гусь-Хрустального и Александровского районов, метрологические подразделения предприятий.

*Владимирский отдел метрологии* занимается контролем, поверкой СИ; лицензированием работ по проектированию, изготовлению, ремонту, прокату и продаже СИ (ПР50.2.006(007); ПР50.50.2.005); проводит аккредитацию на право поверки СИ (ПР50.2.014), калибровки СИ (ПР50.2.016-96), разработки и аттестации МВИ (ГОСТ 8.563-97); проводит экспертизу документации, аттестацию испытательного оборудования по ГОСТ 8.568-97 в соответствии с ПР50.2.013-97; осуществляет подготовку и переподготовку специалистов-метрологов, организует их стажировку и аттестацию по ПР50.2.012-94.

*Отдел Госнадзора* проводит надзор:

- 1) за обязательными требованиями стандартов;
- 2) состоянием и применением СИ, МВИ, норм и правил по метрологии;
- 3) правилами отчуждения товара при совершении торговых операций;
- 4) расфасовкой товаров и продуктов (ПР50.2.004-94).

*Органы сертификации состоят:*

- 1) органа сертификации пищевых продуктов;
- 2) органа сертификации работ и услуг автотранспорта; радио- и электробытовых товаров и услуг.

У директора ВЦСМ есть заместители по сертификации пищевой продукции, ремонту автотранспорта, электробытовой и радиотехнической продукции. ВЦСМ взаимодействует с пожарной, торговой, транспортной инспекциями; ГАИ, УВД, учебной инспекцией, антимонопольным комитетом, ВлГУ и другими организациями, в том числе с метрологическими службами юридических лиц, имеющими право поверки СИ в ограниченной области (для собственных нужд) и ограниченной номенклатуры (г. Радужный; Институт вирусологии; КЭМЗ; Завод им. Дегтярёва, г. Ковров; «Эталон», ВлГУ и ряд юридических лиц, имеющих право калибровки СИ).

*Основные виды деятельности ВЦСМ:*

1. В области стандартизации:
  - а) комплексное обследование предприятий для выработки рекомендаций по повышению качества выпускаемой продукции;
  - б) проверки для выдачи разрешений на производство;
  - в) надзор за стандартами и средствами измерений;
  - г) проведение экспертных испытаний качества продукции;
  - д) методическая помощь в организации службы стандартизации и метрологии;

- е) информационное обслуживание предприятий;
- ж) помощь в обучении по стандартизации и метрологии.

2. В области испытаний и сертификации:

- а) комплексное обследование предприятий с целью выдачи разрешения на выпуск сертифицированной продукции;
- б) проведение государственных испытаний средств измерений;
- в) участие в проведении государственных испытаний продукции.

3. В области метрологии:

- а) поверка средств измерений;
- б) аттестация нестандартных СИ и испытательного оборудования;
- в) аттестация измерительных, испытательных и метрологических лабораторий и отделов;
- г) выполнение специальных измерений с использованием уникального поверочного оборудования;
- д) метрологическое сопровождение разработки средств измерений, измерительных комплексов и систем;
- е) метрологическая аттестация информационно-измерительных систем, комплексов, роботов;
- ж) консультации по всем вопросам метрологии, стандартизации, сертификации.

***Контрольные вопросы***

1. Какова структура метрологической службы в России?
2. Назовите государственные научные метрологические центры.
3. Каковы функции ЦСМС?
4. Что такое ГСВЧ ?
5. Какие вы знаете МС федеральных органов управления?
6. Какова структура МС федерального органа управления?
7. Какова структура МС юридического лица на примере промышленного предприятия?
8. Какие обязанности возлагаются на МС предприятия?
9. Какова цель проведения метрологической экспертизы?
10. Что подвергают метрологической экспертизе?
11. Что такое метрологический контроль и надзор?
12. Какие области и виды деятельности относятся к сфере государственного контроля и надзора?
13. Что включает в себя государственный метрологический контроль?
14. Чем занимается Владимирский ЦСМ?

## Лекция 4. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ЗА СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

### 1. Основы государственного контроля

*Утверждение типа СИ* – первая составляющая государственного метрологического контроля. Оно необходимо для постановки на производство и выпуска в обращение новых типов СИ или их ввоза из-за границы. Процедура утверждения предусматривает обязательные испытания СИ, принятие решения об утверждении типа, его государственную регистрацию и выдачу сертификата об утверждении типа.

Утвержденный тип СИ подлежит внесению в *Государственный реестр*, который ведет Госстандарт РФ. На СИ утвержденного типа и эксплуатационные документы наносится знак утверждения типа установленной формы. По истечении срока действия сертификата, при ухудшении показателей качества или внесении в их конструкцию изменений проводятся испытания на соответствие СИ утвержденному типу. Согласно международным соглашениям Госстандартом РФ может быть принято решение о признании результатов испытаний или утверждении типа СИ, проведенных за рубежом.

*Метрологическая аттестация СИ* – признание СИ пригодным для применения (с указанием метрологического назначения и метрологических характеристик) на основании тщательных исследований его метрологических свойств. Как правило, МА подвергают СИ, не проходящие ГПИ или предназначенные для использования в качестве ОСИ.

*Государственные приемочные испытания СИ* – испытания образцов изготовленных СИ новых типов, предназначенных для серийного выпуска, или образцов СИ, подлежащих ввозу из-за границы партиями.

*Государственные контрольные испытания СИ* – испытания образцов СИ, проводимые периодически с целью контроля качества серийно выпускаемых или ввозимых из-за границы партиями СИ на соответствие утвержденному типу.

*Поверка средств измерений*, в том числе эталонов, осуществляется органами государственного метрологического контроля. Согласно Закону РФ «Об обеспечении единства измерений» допускается продажа и выдача напрокат только поверенных СИ. В отличие от процедуры утверждения типа, в которой участвует только типовой представитель СИ, *поверке подлежит каждый экземпляр СИ*.

Перечни групп СИ, подлежащих поверке, утверждаются Госстандартом. Развернутые перечни СИ, подлежащих поверке, составляют юридические и физические лица – владельцы СИ. Поскольку ежегодная потребность в поверке велика (около 1 млн единиц СИ), а органы Государственной метрологической службы своими силами не могут обеспечить такой объем работы, Госстандарт РФ может предоставить право поверки СИ аккредитованным метрологическим службам юридических лиц.

Поверка СИ осуществляется аттестованным в качестве поверителя физическим лицом. Если СИ признано пригодным, то на него или на техническую документацию наносят оттиск *индивидуального* поверительного клейма или выдают свидетельство о поверке.

В РФ применяют следующие виды поверок СИ.

*Первичной поверке* подлежат СИ утвержденных типов при выпуске из производства и после ремонта, а также при ввозе по импорту.

*Периодической поверке* подлежат СИ, находящиеся в эксплуатации или на хранении. Результаты периодической поверки действительны в течение межповерочного интервала. Первый межповерочный интервал устанавливается при утверждении типа. В дальнейшем межповерочные интервалы разрабатывают органы Государственной метрологической службы совместно с юридическими лицами-пользователями.

*Внеочередную поверку* осуществляют в следующих случаях:

- повреждение знака поверительного клейма или утрата свидетельства о поверке;
- ввод в эксплуатацию СИ после длительного хранения (более одного межповерочного интервала);
- неудовлетворительная работа прибора или проведение повторной настройки после ударного воздействия на СИ.

*Инспекционную поверку* проводят для выявления пригодности к применению СИ при осуществлении государственного метрологического надзора.

*Экспертную поверку* проводят при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам, исправности СИ и пригодности их к применению.

*Лицензирование деятельности по изготовлению, ремонту, продаже и прокату СИ* – другая составляющая государственного метрологического контроля. Согласно Закону «Об обеспечении единства из-

мерений» деятельность по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений, относящихся к сфере распространения государственного метрологического надзора, должна подвергаться лицензированию органами Государственной метрологической службы.

*Лицензия* – это документально оформленное разрешение, выдаваемое органом Государственной метрологической службы на закрепленной за ним территории юридическому или физическому лицу, на осуществление им деятельности по изготовлению, ремонту, продаже или прокату СИ.

Лица, претендующие на получение лицензии на изготовление СИ, должны иметь сертификат об утверждении типа СИ.

Лицензия действительна на всей территории Российской Федерации и выдается на срок не более 5 лет. Повторное лицензирование может быть осуществлено по сокращенной программе.

## ***2. Передача размеров единиц физических величин***

Единство измерений достигается путем точного воспроизведения и хранения в специализированных организациях установленных единиц физических величин и передачи их размеров применяемым на практике СИ. Воспроизведение единицы физической величины осуществляется в результате операций по материализации единицы физической величины с помощью государственного эталона. Различают воспроизведение *основной* и *производной* единицы.

*Передача размера единиц* – это приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым СИ, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке или калибровке. Размер единицы передается от более точных средств измерений к менее точным СИ.

Поверка и калибровка представляют собой совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения соответствия СИ документально установленным техническим требованиям.

*Суть поверки средств измерений* заключается в нахождении погрешности СИ и установлении его пригодности к применению. По содержанию поверка СИ – это совокупность операций, выполняемых органами Государственной метрологической службы или другими уполномоченными организациями с целью определения и подтверждения соответствия СИ установленным техническим требованиям. Процедура поверки регламентируется нормативными документами.

Поверка носит *обязательный характер* и проводится в отношении СИ, которые применяются в установленных Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» сферах: здравоохранение, охрана окружающей среды, обеспечение обороны государства и др.

*Калибровка средств измерений* – комплекс операций, осуществляемых с целью определения и подтверждения действительных значений характеристик и (или) пригодности к применению СИ, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору.

В ст. 23 Закона «Об обеспечении единства измерений» указывается на добровольный характер применения калибровки. Она может осуществляться метрологической службой юридического лица или любой другой аккредитованной на право проведения калибровочных работ организацией. Средства измерений, прошедшие калибровку, удостоверяют калибровочным знаком или соответствующим сертификатом.

Высшим звеном в метрологической цепи передачи размеров единиц измерений являются эталоны. Эталон представляет собой средство измерений (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины (или одну из этих функций) с целью передачи размера единицы образцовым СИ, а от них рабочим средствам измерений, утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

Соподчинение государственного эталона, вторичных эталонов и рабочих средств измерений определено государственной поверочной схемой.

*Поверочная схема* – это утвержденный документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи размеров единиц от государственного эталона рабочим средствам измерений.

Различают государственные и локальные поверочные схемы. *Государственные поверочные схемы* определяются государственными стандартами и распространяются на все СИ данного вида. *Локальные поверочные схемы* предназначены для метрологических органов министерств и метрологических служб юридических лиц и должны соответствовать требованиям соподчинения, определяемым государственной поверочной схемой.

Передача информации о размере единиц осуществляется методами непосредственного сличения, а также с помощью компаратора. Непосредственное сличение применяют, как правило, для менее точных мер.

### 3. Обобщенная схема поверки (ОСП)

ОСП включает в себя три уровня: I – уровень эталонов; II – уровень образцовых мер и средств измерения; III – уровень рабочих мер и приборов.

Обобщенная схема поверки приведена на рис. 4.1.

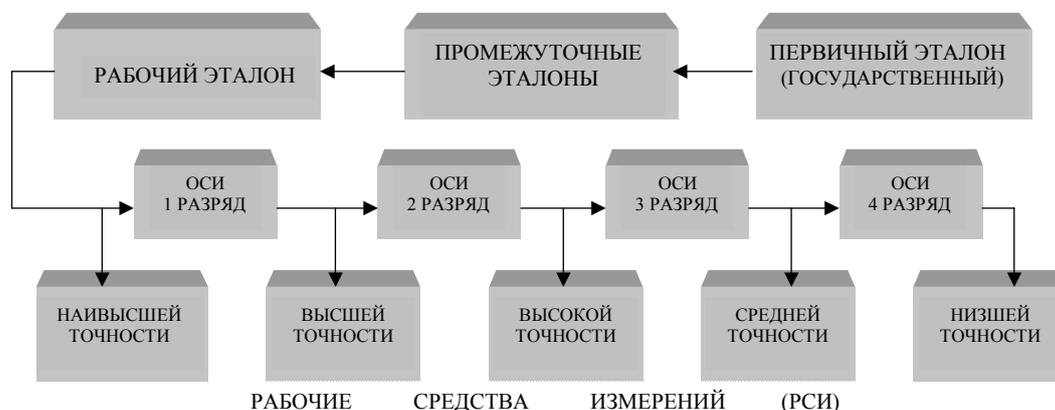


Рис. 4.1

*Эталон единицы физической величины* – средство измерений или комплекс средств измерений, предназначенные для воспроизведения и хранения единицы (шкалы) и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме (или менее точным) средствам измерений и утвержденные в качестве эталона в установленном порядке. По степени международного (национального) признания различают международные и национальные эталоны.

*Первичный эталон* – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы (или шкалы) с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью. *Специальный эталон* – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы (шкалы) в особых условиях и служащий для этих условий первичным эталоном.

Специальные эталоны установлены для воспроизведения единиц в условиях, в которых прямая передача размера единицы от существующих эталонов технически неосуществима с требуемой точностью (высокие и сверхвысокие частоты; высокие энергии, давления, температуры; особые состояния вещества; крайние участки диапазона измерений и т. п.).

Пример специального эталона – эталон мощности электромагнитных волн при частотах 2,6 – 37,5 Гц в волноводных трактах.

*Государственный эталон* – первичный или специальный эталон, официально утвержденный Госстандартом в качестве исходного для страны.

Государственные эталоны всегда представляют собой комплексы средств измерений и вспомогательных устройств, обеспечивающие воспроизведение единицы и в необходимых случаях ее хранение, а также передачу размера единицы вторичным эталонам.

В метрологической практике большое распространение получили вторичные эталоны. Они составляют часть совокупности подчиненных средств хранения единиц и передачи их размера, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ и обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона.

Классификация эталонов показана на рис. 4.2.



Рис. 4.2

*Вторичный эталон* – эталон, получающий размер единицы путем сличения с первичным эталоном той же единицы.

*Эталон-свидетель* – вторичный эталон, предназначенный для сохранности государственного эталона.

*Эталон-копия* – вторичный эталон, предназначенный для передачи размера рабочим эталонам. Создается при большом объеме поверочных работ. Примером служит эталон-копия единицы массы в виде платиноиридиевой гири № 26 и рабочий эталон килограмма, изготовленный из нержавеющей стали.

*Эталон сравнения* (эталон переносчик) – вторичный эталон, предназначенный для сличения эталонов, которые по каким-либо причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом.

*Рабочий эталон* передает единицу размера образцовым средствам первого разряда и рабочим средствам наивысшей точности.

Наиболее точный эталон (или ОСИ) в данном конкретном органе метрологической службы называется *исходным*.

Для эталонов указывают:

- случайную погрешность воспроизведения единицы измерения, выраженную в виде среднего квадратичного отклонения результата измерений;

- неисключенную систематическую погрешность воспроизведения единицы измерения.

*Одиночный эталон* состоит из одной меры, одного измерительного прибора или одной измерительной установки, обеспечивающих воспроизведение или хранение единицы самостоятельно, без участия других средств измерений того же типа. Примерами одиночного эталона служат вторичные эталоны единицы массы в виде платиноиридиевой и стальных гирь.

*Групповой эталон* состоит из совокупности однотипных мер, измерительных приборов или других средств измерений, применяемых как одно целое для повышения надежности хранения единицы.

Размер единицы, хранимой групповым эталоном, определяется как среднее арифметическое из значений, воспроизводимых отдельными мерами и измерительными приборами, входящими в состав группового эталона. Отдельные меры и измерительные приборы, входящие в групповой эталон, применяют в качестве одиночных рабочих эталонов, если это допустимо по условиям хранения.

Групповые эталоны бывают постоянного и переменного состава. В групповые эталоны переменного состава входят меры и измерительные приборы, периодически заменяемые новыми.

*Эталонный набор* представляет собой эталон в виде набора мер или измерительных приборов, позволяющий хранить единицу или измерять величину в определенном диапазоне, в котором отдельные меры или измерительные приборы набора предназначены для различных значений или различных областей значений измеряемой величины.

Примером эталонного набора является рабочий эталон единицы плотности жидкостей в виде набора денсиметров, служащих для определения плотности жидкостей в различных участках диапазона. Подобно групповым эталонам эталонные наборы могут быть постоянного и переменного состава.

*Образцовое средство измерений* – средство измерений, предназначенное для поверки подчиненных ОСИ и рабочих СИ. В практике большинства стран термин ОСИ не применяется. Все ОСИ, стоящие над рабочими СИ, называют *рабочими эталонами различного ранга* (разряда).

*Примечания:*

1. Далеко не всегда ОСИ точнее рабочего СИ. Например, для поверки вольтметра класса 5 достаточно иметь ОСИ класса 1,5; в то же время существуют рабочие вольтметры классов 0,5; 0,2 и т.д.

2. В качестве ОСИ могут использоваться рабочие СИ достаточной точности, прошедшие метрологическую аттестацию и имеющие ранг ОСИ.

*Образцовые меры и приборы* – это меры и приборы предназначенные для хранения единиц измерения с меньшей точностью чем эталоны, а так же для поверки других мер и приборов.

#### **4. Калибровка средств измерений**

*Калибровка* – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, *не подлежащего* государственному метрологическому контролю и надзору.

При определении и подтверждении действительных значений метрологических характеристик СИ лаборатория, калибрующая СИ, не делает вывода о пригодности прибора. Установленные характеристики могут отличаться от паспортных, и только заказчик определяет условия и цели использования данного СИ.

В Законе «Об обеспечении единства измерений» указывается на добровольный характер и область применения калибровки: «Средства измерений, не подлежащие поверке, могут подвергаться калибровке при выпуске из производства или ремонта или ввозе по импорту, при эксплуатации, прокате и продаже», однако добровольный характер

калибровки не освобождает метрологическую службу от необходимости использования при калибровочных работах эталонов, соподчиненных с государственными эталонами единиц величин.

Калибровка может быть возложена как на метрологическую службу юридического лица, так и на любую другую аккредитованную организацию, способную выполнить калибровочные работы. Результаты калибровки СИ удостоверяют калибровочным знаком, наносимым на прибор, записью в эксплуатационных документах или сертификатом о калибровке.

Аккредитация на право проведения калибровки – процедура добровольная. Она необходима тогда, когда предприятие поставляет продукцию на зарубежные рынки. В этом случае торговый партнер может потребовать от поставщика подтверждения того, что характеристики продукции измерялись СИ, проверенными аккредитованной метрологической службой.

Для проведения калибровочных работ создана и функционирует Российская система калибровки, деятельность которой регулируется соответствующими нормативными документами.

### ***5. Метрологическая надежность СИ***

*Метрологической надежностью* называют способность СИ сохранять установленное значение метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации.

Надежность СИ – обобщенное понятие, включающее в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

*Стабильность СИ* – качественная характеристика, отражающая неизменность во времени его метрологических характеристик.

*Безотказность* – свойство СИ непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени.

*Долговечность* – это свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния, когда его применение уже недопустимо.

*Ремонтпригодность* – свойство СИ, заключающееся в приспособленности в случае отказов к восстановлению путем технического обслуживания и ремонта.

*Сохраняемость* – свойство стандартных образцов сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности не только в течение эксплуатации, но и после хранения и транспортирования.

### **6. Система сертификации средств измерений**

В России сформирована Система сертификации средств измерений, которая включает в себя: центральный орган – Управление метрологии Госстандарта РФ, Координационный совет, Апелляционный комитет, Научно-методический центр, органы по сертификации, испытательные лаборатории (центры) средств измерений.

Цель Системы – обеспечение единства измерений. Основная задача – проверка и подтверждение соответствия средств измерения установленным документально метрологическим нормам и требованиям.

Система носит добровольный характер, открыта для вступления и участия в ней юридических лиц – изготовителей, органов по сертификации, испытательных лабораторий и всех других заинтересованных предприятий, организаций и отдельных лиц.

Сертификацию осуществляют аккредитованные органы по сертификации средств измерений с учетом результатов испытаний аккредитованных лабораторий при наличии лицензионного соглашения с органом сертификации, который несет ответственность за объективность и достоверность результатов.

Аккредитацию органов по сертификации осуществляет Управление метрологии Госстандарта. Сертификат соответствия выдает также Управление метрологии или иной орган по сертификации средств измерений на основе лицензии.

Порядок проведения сертификации включает в себя следующие этапы:

- подачу заявителем заявки в центральный орган системы на проведение сертификации;
- рассмотрение заявки и принятие решения по ней;
- проведение испытаний;
- сертификацию производства или системы качества, если это предусмотрено принятой схемой сертификации;
- анализ результатов, принятие решения о выдаче сертификата;
- выдача сертификата соответствия и информация о результатах сертифицирования.

Работа Системы сертификации средств измерений осуществляется на основе рекомендаций МИ 2277-93, МИ 2278-93 и МИ 2279-93.

## ***7. Международные метрологические организации***

Международное сотрудничество в области метрологии – важный фактор в решении задач в таких областях, как торговля, научно-техническое сотрудничество, в решении проблемы сырья, топлива и энергетики, продовольствия, охраны окружающей среды, использования ресурсов Мирового океана. Метрология обеспечивает решение перечисленных проблем при соблюдении единства измерений как необходимого условия сопоставимости результатов испытаний и сертификации продукции. Именно эта задача является важнейшей в деятельности международных метрологических организаций, благодаря усилиям которых принята Международная система единиц физических величин (СИ), действует сопоставимая терминология, приняты рекомендации по испытаниям средств измерений перед выпуском серийной продукции и т. д.

Россия принимает активное участие в международных организациях по метрологии. Среди них наиболее известны Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), Международная организация мер и весов (МОМВ), Европейская организация по метрологии (ЕВРОМЕТ) и ряд других.

*Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ)* – межправительственная организация, созданная по инициативе СССР в 1956 г. Россия участвует в ней как правопреемница Советского Союза. Организация объединяет более 80 государств.

Главные цели МОЗМ — разработка общих вопросов законодательной метрологии, в том числе установление классов точности СИ, рекомендаций по испытаниям с целью установления единообразия метрологических характеристик СИ независимо от страны-изготовителя, обеспечение единообразия определения типов и образцов систем СИ, определение порядка поверки и калибровки средств измерений.

МОЗМ издает международные рекомендации, которые охватывают следующие вопросы: терминологию в области метрологии, требования к метрологическим характеристикам СИ, способы выражения погрешностей СИ и результатов измерений, требования к метрологической деятельности, которые касаются испытаний, поверки, сертификации, калибровки СИ, метрологического контроля и надзора за обеспечением единства измерений. Документы МОЗМ носят рекомендательный характер.

Россию в МОЗМ представляет Госстандарт РФ, а также министерства и ведомства. Участие России в работе МОЗМ позволяет активно влиять на содержание принимаемых рекомендаций, что дает

возможность совершенствовать метрологическую деятельность в стране, гармонизировать ее с деятельностью международных организаций – Международной организации мер и весов, Международной электротехнической комиссии (МЭК), Международной организации по стандартизации (ИСО) и др.

*Международная организация мер и весов* была создана в 1875 г. на основе Метрической конвенции, подписанной 17 государствами, в том числе Россией. В настоящее время ее членами являются 50 стран мира.

Цель МОМВ — унификация национальных систем единиц измерений физических величин и установление единых фактических эталонов длины и массы (метра и килограмма).

В соответствии с упомянутой выше конвенцией было создано *Международное бюро мер и весов* (МБМВ) – международная научно-исследовательская лаборатория, которая хранит международные эталоны. В практическом плане главная задача МБМВ – сличение национальных эталонов с международными. Научное направление работы Бюро – совершенствование метрической системы измерений и международных эталонов, разработка и применение новых методов и средств точных измерений, координация научно-исследовательских работ стран-членов в области метрологии.

Результаты научных работ МОМВ значительны. Достаточно назвать принятие Международной системы единиц, нового определения секунды, метра, электрических единиц и др. Важный результат участия в работе МОМВ – переход стран на единые единицы и эталоны. Это обеспечивает основу для взаимного признания результатов измерений и испытаний, позволяет устранить технические барьеры в международной торговле.

Среди региональных международных организаций по метрологии, которые появились в последние годы, следует упомянуть *Европейскую организацию по метрологии* (ЕВРОМЕТ). ЕВРОМЕТ работает в области исследования и разработки национальных эталонов, содействует развитию поверочных служб стран-членов на высшем метрологическом уровне, разрабатывает методы измерения наивысшей точности.

Многие международные организации, формально не являясь метрологическими организациями, наряду со своей основной деятельностью разрабатывают международные стандарты и рекомендации по метрологической терминологии и методикам выполнения измерений при испытаниях продукции, а также по установлению шкал измерений и т.д.

Специальными вопросами метрологии и измерительной техники занимается ряд других международных организаций, таких как Международный консультативный комитет по радиосвязи (МККР), Международная организация гражданской авиации (ИКАО), Международное агентство по атомной энергетике (МАГАТЭ) и др.

Между государствами – бывшими республиками СССР, членами СНГ подписано Межправительственное соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации. В соответствии с этим документом сохраняется единство измерений на основе государственных стандартов СССР, использование единых эталонов, стандартных справочных данных, стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов. Соглашение содержит положение о взаимном признании результатов испытаний средств измерений и их поверки.

### ***Контрольные вопросы***

1. Каким образом и для чего осуществляется утверждение типа СИ?
2. Что такое метрологическая аттестация СИ?
3. Какие СИ проходят МА?
4. Что такое государственные приемочные испытания СИ?
5. Что такое государственные контрольные испытания СИ?
6. Какие органы имеют право поверки СИ?
7. Какое физическое лицо имеет право поверки СИ?
8. Что такое поверительное клеймо и свидетельство о поверке?
9. Назовите виды поверки и их особенности.
10. Какая деятельность с СИ подлежит лицензированию органами ГМС ?
11. Что такое лицензия и кому она выдается?
12. Что такое калибровка средств измерений? Когда и кем она осуществляется?
13. Что такое эталон?
14. Что такое поверочная схема и какие они бывают?
15. Как осуществляется передача информации о размере единицы ФВ?
16. Какие бывают эталоны и в чем их особенности?
17. Что такое метрологическая надежность СИ и какие понятия она включает?
18. Каков порядок проведения сертификации?
19. Назовите международные организации по метрологии.

## Лекция 5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

### *1. Факторы, влияющие на результаты измерений*

В соответствии с ГОСТ Р 8.000 – 2000 *измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. В зависимости от степени приближения результата измерения к объективности различают истинное, действительное и измеренное значения физической величины.

*Истинное значение физической величины* – это значение, идеально отражающее в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Из-за несовершенства средств и методов измерений истинные значения величин практически получить нельзя. Их можно представить только теоретически.

*Действительное значение физической величины* – это значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него.

*Измеренное значение физической величины* – это значение, полученное при измерении с применением конкретных методов и средств измерений.

*Погрешностью измерения* называют отклонение результата измерения от истинного (идеального) значения измеряемой величины. Поскольку истинное значение величины неизвестно, то в метрологических работах вместо истинного значения используют действительное, за которое принимают показание эталонов.

В метрологической практике при проведении измерений необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на результаты измерения: объект и субъект измерения, метод, средство и условия измерения.

*Объект измерения* должен быть чист от посторонних включений, если измеряется плотность вещества, свободен от влияния внешних помех (природные процессы, индустриальные помехи и т. п.). Сам объект не должен обладать внутренними помехами (работа самого объекта измерения). *Субъект измерения*, т. е. оператор, привносит в результат «личностный» момент измерения, элемент субъективизма. Он зависит от квалификации оператора, санитарно-гигиенических условий труда, психофизиологического состояния субъекта, от учета эргономических требований.

*Метод измерения.* Очень часто измерение одной и той же величины постоянного размера разными методами дает различные результаты, причем каждый из них имеет свои недостатки и достоинства. Искусство оператора состоит в том, чтобы соответствующими способами исключить или учесть факторы, искажающие результаты. Если измерение не удастся выполнить так, чтобы исключить или компенсировать какой-либо фактор, влияющий на результат, то в последний в ряде случаев вносят соответствующую поправку.

Влияние СИ на измеряемую величину во многих случаях проявляется как возмущающий фактор, например внутренние шумы измерительных электронных усилителей. Неправильные показания СИ могут быть результатом дефекта изготовления отдельных его частей.

Другой фактор – инерционность СИ, не успевающего отреагировать на изменение сигнала. При этом некоторые СИ дают постоянно завышенные или постоянно заниженные показания.

*Условия измерения* как влияющий фактор включают в себя температуру окружающей среды, влажность, атмосферное давление, напряжение в сети и т. п. Учет указанных факторов предполагает исключение ошибок и внесение поправок к измеренным величинам.

## ***2. Классификация погрешностей измерений***

**1. По причинам появления** можно выделить следующие погрешности: методические, инструментальные и субъективные.

*Методические* погрешности обусловлены несовершенством метода измерения, допущениями и упрощениями при использовании эмпирических зависимостей и др. Они закладываются и известны *на стадии проектирования*, например погрешность, связанная с ценой деления. Все методические погрешности для приборов одного типа всегда одинаковы. Отличительная особенность методических погрешностей – то, что они могут быть определены лишь путем создания математической модели, или имитационным моделированием измеряемого объекта и не могут быть найдены при сколь угодно тщательном исследовании лишь самого измерительного прибора.

Если при проектировании прибора сделаны какие-то допущения, округления, приближения, то они приведут к погрешности уже в уравнении измерения или в статистической характеристике прибора. Например, при измерении мощности методом детектирования подразумевается, что характеристика детектора квадратичная на начальном участке и линейная при больших сигналах. Реальная характеристика отличается от принятой модели.

Методическая погрешность может быть также обусловлена влиянием измерительного устройства на измеряемую величину. Примером может служить погрешность шунтирования, возникающая при измерении напряжения вольтметром. Вследствие шунтирования входным сопротивлением вольтметра того участка цепи, на котором измеряется напряжение, оно оказывается меньше, чем было до присоединения вольтметра. Поэтому для одного и того же вольтметра, присоединяемого поочередно к разным участкам исследуемой цепи, эта погрешность различна: на низкоомных участках – ничтожна, а на высокоомных может быть очень большой.

Размер этой переменной погрешности не может быть указан в паспорте прибора, и она является методической. Для расчета этой погрешности пользователь должен при каждом конкретном измерении напряжения оценивать сопротивление исследуемой цепи между точками, к которым присоединен вольтметр, т.е. проводить дополнительное исследование объекта измерения.

Часто причиной возникновения методической погрешности является то, что, организуя измерения, нередко измеряют или вынуждены измерять не ту величину, которая в принципе должна быть измерена, а некоторую другую, близкую, но неравную ей. Этот прием замены позволяет создавать наиболее простые, надежные и универсальные приборы.

Когда метод уже воплощен в приборе, то его погрешности должны быть изучены, определены и занесены в паспорт. С этого момента вне зависимости от причин возникновения погрешности для пользователя могут считаться инструментальными.

*Инструментальные* погрешности обусловлены свойствами средств измерений: неидеальностью составных частей, несовершенством технического процесса изготовления прибора и разбросом параметров элементов. К этим погрешностям относят также погрешности, связанные с влиянием внешних факторов и режима питания.

*Субъективные* погрешности обусловлены влиянием на результаты оператора, снимающего показания (например погрешность параллакса).

**2. По условиям появления** погрешности подразделяются на статические (основную и дополнительную) и динамические (основную и дополнительную).

*Статическая погрешность* – это погрешность прибора в установившемся режиме работы.

*Динамическая погрешность* – погрешность, возникшая в неустановившемся режиме измерений. Это добавка к статической погрешности.

Средства измерений могут применяться в нормальных и рабочих условиях. Эти условия для конкретных видов СИ установлены в стандартах или технических условиях.

*Нормальным условиям* применения средств измерений должен удовлетворять ряд следующих (основных) требований: температура окружающего воздуха ( $20 \pm 5$ ) °С; относительная влажность ( $65 \pm 15$ ) %; атмосферное давление ( $100 \pm 4$ ) кПа; напряжение питающей сети ( $220 \pm 4$ ) В и ( $115 \pm 2,5$ ); частота сети ( $50 \pm 1$ ) Гц и ( $400 \pm 12$ ) Гц. Как следует из перечисленных требований, нормальные условия применения СИ характеризуются диапазоном значений влияющих на них величин в виде климатических факторов и параметров электропитания.

*Рабочие условия* (табл. 5.1) применения СИ определяются диапазоном значений влияющих величин не только климатического характера и параметров электропитания, но и вида механических воздействий. В частности, диапазон климатических воздействий делится на ряд групп, охватывающих широкий диапазон изменений окружающей температуры. В рабочих условиях прибор функционирует, и может быть оценена его дополнительная погрешность.

Таблица 5.1

Влияющий фактор		Группа						
		1*	2	3	4	5	6	7**
Температура Т, °С	min	10	10	5	-10	-30	-50	-30
	max	25	35	40	40	50	60	70
Максимальная влажность, %, при температуре Т, °С		80	80	90	90***	90	95	90
		20	25	25	30	30	35	30
Атмосферное давление, мм. рт. ст.		630...800				460...800		
Напряжение питания, В		220±22 (±10 %)						

Для вычислительной техники рекомендуется 2-я группа, для измерительных приборов – 3-я группа, для аппаратуры со специальными свойствами – 4, 5, 6-я группы.

*Основная погрешность* – это погрешность в нормальных условиях работы (или номинальных).

\* – соответствует основным мерам измерительных вычислительных устройств.

\*\* – 7-я группа для составных частей приборов 5-й группы.

\*\*\* – вместо 90 % при 30 °С можно задать 98 % при 25 °С.

*Дополнительная погрешность* – часть статической погрешности, которая обусловлена отклонением условий работы от нормальных. Обычно дополнительная погрешность представлена в виде некой добавки на изменение внешних условий. Например, дополнительная погрешность не превышает половины основной при отклонении температуры на 10 °С.

*Основная статическая погрешность* в зависимости от причин ее появления может быть разделена на виды:

- погрешность приближения;
- погрешность от несоответствия параметров СИ или его частей номиналу;
- погрешность от действия внутренних дестабилизирующих факторов.

*Общая статическая погрешность*  $\Delta Y_{ст} = \Delta Y_{осн} + \Delta Y_{доп}$ .

*Основная динамическая погрешность* – погрешность при номинальных условиях. На нее влияют инерционные элементы: масса подвижных частей, индуктивности, емкости и т.д. При преобразовании тепловых величин (термисторные измерители мощности, calorиметрические) возникает запаздывание установления температуры.

*Общая динамическая погрешность*  $\Delta Y_{д} = \Delta Y_{осн} + \Delta Y_{доп}$ .

Полная погрешность  $\Delta Y_{п} = \Delta Y_{д} + \Delta Y_{ст}$ .

**3. По характеру связи между величиной погрешности и уровнем сигнала** различают аддитивные, мультипликативные, степенные, периодические и комбинированные (комплексные) погрешности (рис. 5.1).

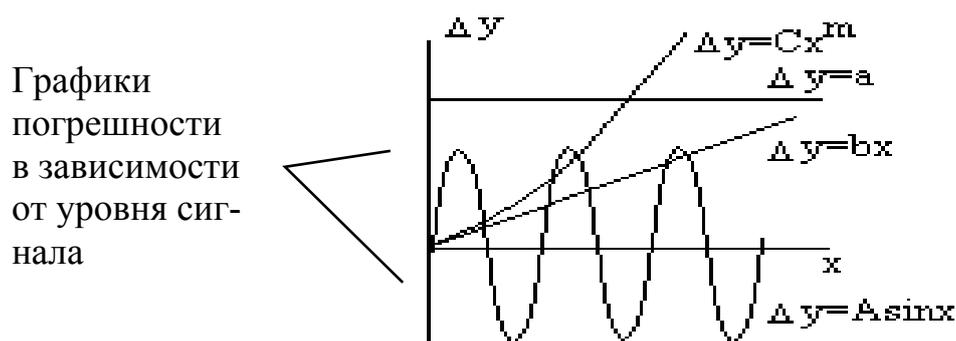


Рис. 5.1

На рис. 5.1  $\Delta y = a = \text{const}$  – аддитивная погрешность не зависит от величины сигнала;  $\Delta y = bx$ ,  $b = \text{const}$  – мультипликативная погрешность зависит от сигнала линейно;  $\Delta y = Cx^m$ ,  $C = \text{const}$  – степенная погрешность (квадратичная, кубическая);  $\Delta y = A \sin x$  – периодическая погрешность.

В реальных приборах характер погрешности всегда более сложен, поскольку составляющих несколько и  $\Delta Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots$ .

**4. По размерности** различают погрешности: абсолютную, относительную, приведенную и относительную приведенную. Понятие относительной погрешности применимо для величин, описываемых шкалами отношений и разностей.

*Абсолютная погрешность* – разность между полученным и истинным значением  $\Delta y = y_{\text{ИЗМ}} - y_0$ . Выражается в единицах измеряемой величины.

*Относительная погрешность* – отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины  $\delta = \Delta y / y_0 \approx \Delta y / y_{\text{ИЗМ}}$  (используется на практике). Так как найти истинное значение трудно, то абсолютную погрешность можно оценить исходя из паспортных данных на прибор.

*Приведенная относительная погрешность* – отношение абсолютной погрешности к величине диапазона измерения  $\delta_{\text{ПР}} = \Delta y / y_{\text{Д}}$  ( $y_{\text{Д}}$  – предел измерения или максимальное значение шкалы). С ней связано понятие *класса точности* прибора. Он равен наибольшему значению приведенной относительной погрешности, выраженной в процентах ( $K = \delta_{\text{ПР MAX}} \cdot 100 \%$ ).

На практике погрешности приборов могут формироваться в виде двух- или трехчленной формулы.

*Предел основной допускаемой погрешности* – максимальное значение погрешности прибора, при которой он считается исправным. Эта погрешность не является погрешностью конкретного измерения конкретным прибором. Это диапазон, в котором может лежать погрешность. В НД указывается именно эта погрешность, которую следует учитывать в расчетах как инструментальную.

Рассмотрим формы аналитического выражения и способы нормирования пределов допускаемых основной и дополнительной погрешностей средств измерений.

*Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности*, выраженные в единицах измеряемой величины или условно в делениях шкалы СИ, устанавливают по одной из следующих двух формул:

$$1) \Delta = \pm a; \quad 2) \Delta = \pm(a + bx).$$

*Пределы допускаемой относительной основной погрешности* устанавливают как  $\delta = \pm 100\Delta/x = \pm q$ , если  $\Delta = \pm a$ . Здесь  $q$  – положительное число. Пределы допускаемой относительной основной погрешности задают в виде

$$\delta = 100 \frac{\Delta}{x} = \pm \left[ c + d \left( \frac{x_K}{x} - 1 \right) \right].$$

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности устанавливаются по формуле  $\delta_{пр} = \gamma = 100\Delta/X_N = \pm p$ , где  $p$  – положительное число;  $X_N$  – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и абсолютная погрешность  $\Delta$ .

Положительные числа  $q$ ,  $p$ ,  $c$  и  $d$  выбираются из ряда предпочтительных чисел:  $1 \cdot 10^N$ ;  $1,5 \cdot 10^N$ ;  $2 \cdot 10^N$ ;  $2,5 \cdot 10^N$ ;  $4 \cdot 10^N$ ;  $5 \cdot 10^N$ ;  $6 \cdot 10^N$ , где  $N = 1, 0, -1, -2$  и т.д.

Для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой значение  $X_N$  принимают следующим:

- равным большему из пределов измерений или большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение (нулевая метка) находится на краю или вне диапазона измерений;
- сумме модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений.

Представленные формы записи пределов допускаемой основной погрешности используются для установления классов точности СИ, которые имеют различные обозначения (табл. 5.2).

Классы точности измерительных приборов обозначают числами  $c$  и  $d$  (в процентах), разделяя их косой чертой (например 0,05/0,02).

Таблица 5.2

Формула для предельной основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности
$\delta_{пр} = \frac{100\Delta}{X_N} = \pm p$	$\pm p$	Класс точности 1,5
$\delta = 100 \frac{\Delta}{x} = \pm \left[ c + d \left( \frac{x_K}{x} - 1 \right) \right]$	$\pm \left[ c + d \left( \frac{x_K}{x} - 1 \right) \right]$	Класс точности $\frac{c}{d} = \frac{0,02}{0,01}$

Для разных способов нормирования погрешностей средств измерений вычисления погрешностей различны. Рассмотрим характерные случаи.

1. Класс точности прибора указан буквой  $p$ . Тогда абсолютная погрешность результата измерения  $\Delta = \pm p \cdot X_K / 100$ . Пусть класс точности используемого вольтметра 1,0. Проводилось измерение напряжения в точке  $x = 1$  В на пределе измерения  $X_K = 10$  В. Тогда относительная погрешность результата измерения

$$\delta_{пр} = \pm 100 \cdot p / X_K = \pm 100 \cdot 1 / 10 = \pm 10 \text{ \%}.$$

2. Класс точности используемого вольтметра указан как  $c/d$ . В этом случае удобнее вычислить относительную погрешность результата измерения по формуле

$$\delta = 100 \frac{\Delta}{x} = \pm \left[ c + d \left( \frac{X_K}{x} - 1 \right) \right],$$

а затем найти абсолютную погрешность как  $\Delta = \delta_{\text{пр}} \cdot x / 100$ .

Пусть класс точности используемого вольтметра  $c/d=0,02/0,01$ . Измерялось напряжение в точке  $x = 2$  В на пределе измерения  $X_K = 10$  В.

Тогда относительная погрешность результата измерения

$$\delta_{\text{пр}} = \pm \left[ 0,02 + 0,01 \left( \frac{10}{2} - 1 \right) \right] = \pm 0,06 \%,$$

а абсолютная погрешность напряжения  $\Delta = \pm \delta_{\text{пр}} \cdot x / 100 = \pm 0,06 \cdot 2 / 100 = \pm 12 \cdot 10^{-4}$  В.

В цифровых измерительных приборах аддитивная погрешность определяется *погрешностью квантования* (погрешностью дискретности). При плавном изменении входной величины  $x$  (например напряжения в диапазоне 0...5 мВ) цифровой вольтметр с пределом измерения 100 мВ не может дать других показаний, кроме дискретных значений 0, 1, 2, 3, 4, 5 мВ, поэтому при возрастании величины  $x$  от 0 до 0,5 мВ прибор будет показывать  $x=0$ . При превышении значения 0,5 мВ цифровой вольтметр даст показания  $x = 1$  мВ и сохранит его до  $x=1,5$  мВ.

**5. По закономерности появления при многократных испытаниях** погрешности делятся на систематические, прогрессирующие (дрейфовые) и случайные. Грубой погрешностью (промахом) называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях. Результаты измерений с грубой погрешностью отбрасывают.

*Систематические погрешности* остаются постоянными или изменяются по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины. Они изменяются по известному закону в зависимости от сигнала и вызывающих причин, т.е. имеют определенное значение в каждой точке характеристики СИ. По характеру изменения во времени систематические погрешности подразделяют на постоянные и временные. Опасность систематических погрешностей заключается в том, что их присутствие чрезвычайно трудно обнаружить. Единственный способ их обнаружения состоит в проверке прибора путем повторной аттестации по образцовым мерам или сигналам.

Возникают в виде добавки, например, при неправильной установке нуля, коэффициента передачи (калибровочного числа), из-за шумов, которые детектируются измерительной схемой.

Погрешности появляются при неидеальности амплитудной характеристики преобразователей и могут устраняться специальными приемами измерения. Например, погрешность из-за нелинейности характеристики детектора при измерении коэффициента передачи устраняется методом замещения при использовании регулируемого эталонного аттенюатора (меры).

*Прогрессирующими (или дрейфовыми)* называются непредсказуемые погрешности, медленно изменяющиеся во времени (рис. 5.2). Это погрешности, которые обычно носят характер систематических, но если не учитывать момент измерения, то можно считать их случайными. Погрешности, как правило, вызываются процессами старения тех или иных деталей аппаратуры.

Если в какой-то момент времени  $t_0$  прибор поверяется, то его систематическая погрешность минимальна, но с течением времени модуль погрешности будет расти (обычно по экспоненте). Если повторить поверку, то можно привести погрешность к исходному значению. Исходя из этого можно выбрать интервал времени, в течение которого погрешность не превосходит значение основной допустимой погрешности. В соответствии с особенностями прибора этот интервал можно выбрать меньшим или большим (обычно 1 год).

Чтобы повысить точность измерений, необходимо брать прибор сразу после поверки или делать интервал поверки короче.

*Случайные погрешности* возникают в результате совокупного действия различных случайных причин. Они имеют разброс по величине и знаку при многократных испытаниях в одних и тех же условиях. Как правило, случайные погрешности имеют систематическую составляющую. В отличие от известной систематической погрешности ее нельзя исключить из результатов измерений, однако ее значение может быть уменьшено при помощи специальных способов обработки результатов измерений. Для их описания используют вероятностный подход и законы распределения случайных величин. Среднее значение (математическое ожидание) содержит систематическую по-

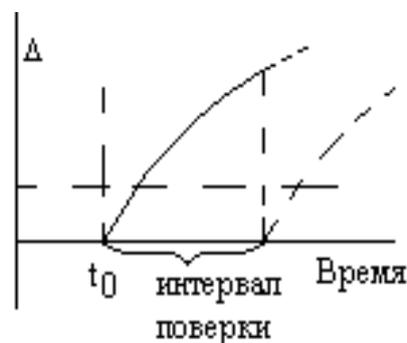


Рис. 5.2

грешность, а разброс значений (дисперсия или среднеквадратическое отклонение (СКО)) характеризует случайную погрешность. Систематической погрешностью принято считать разность

$$\Delta Y_{\text{сист}} = M_1 \{Y_{\text{эксп}}\} - Y_0.$$

Случайные погрешности описываются условными законами распределения (зависящими от сигнала  $X$  или других причин).

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое истинное, действительное и измеренное значение физической величины?
2. Что такое погрешность измерения?
3. Какие факторы, влияющие на результаты измерения, необходимо учитывать?
4. Как уменьшить влияние объекта на результат измерения?
5. Как выбрать метод измерения?
6. В чем состоит влияние СИ на измеряемую величину?
7. По каким условиям можно классифицировать погрешности измерений?
8. Как различить погрешности методические и инструментальные?
9. Как различить погрешности статические и динамические?
10. Как различить погрешности основную и дополнительную?
11. Какие условия считаются нормальными и рабочими?
12. Что такое класс точности прибора? Какие значения он может принимать?
13. Что такое предел основной допускаемой погрешности? Приведите формы аналитического выражения.
14. Что такое промах и как его исключают?
15. Какие погрешности называют систематическими, дрейфовыми и случайными?

*Задача.* Установлено, что максимальная приведенная погрешность вольтметра не превышает  $0,01N\%$  ( $N$  здесь и далее – номер студента по списку группы). Какое значение класса точности следует указать в ТО? Для выбранного класса точности  $p$  определить абсолютную погрешность результата измерения в точке  $x = 4N$  (В) на пределе измерения  $X_K = 100$  В. Оценить относительную и приведенную погрешности результата. Выразить погрешность двучленной формулой, в которой аддитивная и мультипликативная составляющие равны между собой в точке  $x = 4N$  (В) на пределе измерения  $X_K = 100$  В. Записать выражение для относительной погрешности результата измерения.

## Лекция 6. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ

В практике измерений законы распределения могут быть различными, но при анализе погрешностей реальный закон обычно аппроксимируют каким-нибудь более простым законом. Чаще всего применяют законы распределения: нормальный, закон распределения Стьюдента, равномерный, арксинусный, дискретный двузначный, а также их композиции (трапецеидальный, треугольный и др.)

Например, распределение, при котором с равными вероятностями встречаются только два дискретных значения случайной величины  $+a$  и  $-a$ , называется дискретным двузначным распределением. Его плотность распределения вероятностей описывается аналитически как

$$P(x) = [\delta(X-a) + \delta(X+a)]/2, \text{ где } \delta - \text{ функция Дирака.}$$

Подобное распределение имеют цифровые приборы, показания которых принимают случайные значения в пределах дискрета.

Для описания различных свойств распределений используют параметры законов распределения, называемые моментами. Моменты, найденные без исключения систематической составляющей, называются начальными, а найденные для центрированных распределений, – центральными.

Первый начальный момент называется математическим ожиданием. Второй центральный момент – дисперсией случайной величины, он относится к параметрам, характеризующим рассеяние отдельных ее значений от центра распределения.

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины и выражает мощность рассеяния относительно постоянной составляющей, поэтому для более наглядной характеристики самого рассеяния пользуются корнем квадратным из дисперсии, т.е. действующим значением рассеяния, которое называется средним квадратическим отклонением (СКО) и имеет размерность самой случайной величины.

Третий центральный момент  $\mu_3$  характеризует асимметрию, т.е. скошенность распределения: когда один спад крутой, а другой пологий. Для симметричных относительно центра распределений он равен нулю. Третий момент имеет размерность куба случайной величины, поэтому для относительной характеристики асимметрии используют безразмерный коэффициент асимметрии, равный третьему моменту, деленному на куб СКО:  $s = \mu_3/\sigma^3$ .

Четвертый центральный момент характеризует протяженность распределения, а отнюдь не остроту его вершины, как это часто ошибочно указывается. Его относительная величина  $\varepsilon = \mu_4 / \sigma^4$  называется эксцессом распределения и для разных законов может иметь значения от одного для дискретного двузначного распределения до бесконечности для распределения Коши. Во многих пособиях по теории вероятностей вводится коэффициент эксцесса  $\gamma_2 = \varepsilon - 3$ , который для более протяженных распределений, чем нормальное, положителен, а для менее протяженных (треугольного, равномерного, арксинусоидального) отрицателен.

Пусть абсолютная погрешность результата измерений является случайной и обозначается  $\Delta$ . Аналитически случайная погрешность измерений описывается с помощью аппарата теории вероятностей и математической статистики. При такой оценке обычно интересуются вероятностью  $P$  того, что погрешность результата измерений  $\Delta$  находится в некотором заданном интервале распределения погрешностей  $(\Delta_{r1}, \Delta_{r2})$ , где  $\Delta_{r1}$  и  $\Delta_{r2}$  – соответственно нижняя и верхняя границы интервала. Записывается данная вероятность как  $P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2})$ . В общем случае  $0 \leq P \leq 1$ . Если вероятность  $P = 0,6$  и выполнено, например, сто измерений, то можно считать, что шестьдесят значений  $\Delta$  попадают в интервал  $(\Delta_{r1}, \Delta_{r2})$ .

Для определения значения вероятности  $P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2})$  необходимо знать закон  $\rho(\Delta)$  *распределения случайной погрешности  $\Delta$* , называемый *плотностью распределения вероятностей* (или *плотностью вероятностей*) *случайной погрешности  $\Delta$* . При известном законе распределения  $\rho(\Delta)$  искомая вероятность определяется по формуле

$$P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2}) = \int_{\Delta_{r1}}^{\Delta_{r2}} \rho(\Delta) d\Delta.$$

Для интервала  $(-\infty, \infty)$  всегда вероятность  $P(-\infty < \Delta < \infty) = 1$ . Это *условие нормирования плотности распределения вероятностей  $\rho(\Delta)$* . Оно означает, что площадь под графиком любой функции  $\rho(\Delta)$  на интервале всех ее значений должна быть равна единице.

### **1. Нормальный закон распределения погрешностей**

Этот закон применяется при выполнении значительного числа измерений, когда большие погрешности  $\Delta$  появляются реже, чем малые, а частота появления погрешностей, идентичных по абсолютной величине и противоположных по знаку, одинакова.

Для нормального закона распределения

$$\rho(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-\Delta^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) погрешности  $\Delta$ , характеризующее точность выполненных измерений (чем меньше  $\sigma$ , тем выше точность). Это следует из приведенных ниже графиков для различных значений  $\sigma$ . По мере уменьшения  $\sigma$  рассеяние случайных погрешностей  $\Delta$  относительно центра их распределения, т.е. в данном случае относительно значения  $\Delta = 0$ , уменьшается. В теории вероятностей часто используется такой параметр, как дисперсия  $D$ , характеризующая рассеяние погрешностей относительно центра распределения. Причем среднеквадратическое отклонение и дисперсия связаны известной в математической статистике формулой  $\sigma = \sqrt{D}$ .

На графике плотности вероятности для конкретного СКО вероятность численно равна площади  $S$  заштрихованной фигуры, ограниченной функцией  $\rho(\Delta)$ , отрезком оси  $\Delta$  от  $-\Delta_{г1}$  до  $\Delta_{г1}$  и ординатами  $\rho(-\Delta_{г1})$ ,  $\rho(\Delta_{г1})$ . Чем шире заданный интервал погрешностей  $(-\Delta_{г1}, \Delta_{г1})$ , тем больше площадь  $S$ , т.е. больше вероятность попадания случайных погрешностей измерений  $\Delta$  в этот интервал.

Широкое применение в практической метрологии нормального закона распределения (рис. 6.1) объясняется центральной предельной теоремой теории вероятностей (теоремой Ляпунова), утверждающей, что распределение случайных погрешностей будет близко к нормальному во всех случаях, когда результаты наблюдений формируются под влиянием большого числа независимо действующих факторов, каждый из которых оказывает лишь незначительное действие по сравнению с суммарным действием всех остальных.

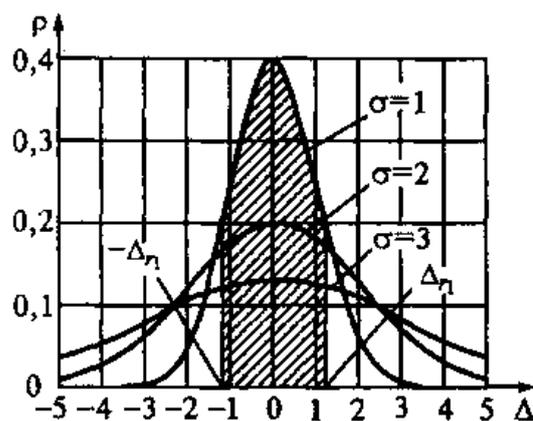


Рис. 6.1

Для нормального закона распределения вероятность того, что случайная составляющая погрешности измерения не выходит за пределы интервала, составляет: при  $\pm 3\sigma$  – 0,9972; при  $\pm 2,6\sigma$  – 0,99; при  $\pm 2\sigma$  – 0,95; при  $\pm 1,6\sigma$  – 0,9.

Погрешность, равная  $3\sigma$ , принята в радиотехнике за *максимальную*. При этом из тысячи выполненных измерений только три их погрешности  $\Delta$  выходят за пределы интервала  $(-3\sigma, 3\sigma)$ .

Нормальный закон распределения случайных погрешностей широко используется при обработке результатов измерений, что объясняется следующими обстоятельствами. Случайная погрешность измерения некоторой величины складывается из многих составляющих, вызванных различными причинами, зачастую трудноуловимыми. Учитывая отмеченное, принимают, что при прямых измерениях закон распределения случайных погрешностей многократных наблюдений некоторой величины соответствует нормальному. Для получения достаточно точных результатов обработки таких наблюдений их число  $n$  должно быть не меньше 20.

## 2. Закон распределения Стьюдента

Наиболее часто этот закон применяется в процессе обработки результатов небольшого числа многократных наблюдений физической величины ( $2 \leq n < 20$ ) и справедлив, когда случайные погрешности наблюдений распределены по нормальному закону. Этот закон описывает распределение плотности вероятности значений случайной величины  $t = (\tilde{x} - x_{и})/\sigma$ , где  $\tilde{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$  – среднее арифметическое значение выполненного ряда наблюдений  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  величины  $x_{и}$ . Он отличается от нормального закона тем, что учитывает число выполненных наблюдений  $n$  и задается функцией, зависящей от относительного аргумента  $t = \Delta/\sigma$ , где  $\Delta = \tilde{x} - x_{и}$  – случайная погрешность:

$$\rho(t)|_n = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\sqrt{\pi(n-1)}} \left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}}, \quad \Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt,$$

где  $n \geq 2$ ;  $\Gamma(n/2)$ ,  $\Gamma((n-1)/2)$  – гамма-функции (интегралы Эйлера).

Из анализа следует, что закон распределения Стьюдента при числе наблюдений  $n \geq 20$  практически совпадает с нормальным нормированным законом, а при  $n < 20$  отличается от него тем значительнее, чем меньше число наблюдений  $n$ . Отличия состоят в увеличении рассеяния относительных погрешностей  $t$  около центра  $t = 0$  по мере уменьшения числа наблюдений. Следовательно, при этом следует ожидать уменьшения вероятности  $P$  попадания погрешностей случайной величины  $t$  в заданный интервал  $(-t_{т1}, t_{т1})$ .

Случайная погрешность определяется по формуле  $\Delta_{\text{сл}} = t(P_d, n)\sigma$ , где  $t(P_d, n)$  – коэффициент Стьюдента (табл. 6.1), характеризующий протяженность распределения.

Таблица 6.1

n	$P_d$							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,00	1,38	1,96	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
3	0,82	1,06	1,34	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93
4	0,77	0,98	1,25	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,74	0,94	1,19	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,73	0,92	1,16	1,48	2,02	2,62	3,37	4,03
7	0,72	0,91	1,13	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,71	0,90	1,12	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
9	0,71	0,89	1,11	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,70	0,88	1,10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
16	0,69	0,87	1,07	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
25	0,69	0,86	1,06	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80

При одной и той же доверительной вероятности с уменьшением числа наблюдений доверительный интервал увеличивается, т.е. точность измерений ухудшается.

### 3. *Равномерный закон распределения плотности вероятности*

Данный закон применяется тогда, когда случайная погрешность измерений с идентичной плотностью вероятности принимает любые значения в ограниченном интервале. Этот закон характерен для случайных погрешностей при измерении непрерывных физических величин методом дискретного счета, при преобразовании таких величин в аналого-цифровых преобразователях (погрешности дискретности, квантования), а также для погрешностей отсчета показаний со шкал приборов.

Все возможные случайные погрешности результата измерений, описываемых равномерным законом, расположены в интервале  $(-\Delta_m, \Delta_m)$ , где  $\Delta_m$  – максимальная погрешность. Аналитически плотность вероятности равномерного закона распределения определяется по формуле

$$\rho(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta_m}, & -\Delta_m \leq \Delta \leq \Delta_m; \\ 0, & \Delta < -\Delta_m \text{ и } \Delta > \Delta_m. \end{cases}$$

Вероятность того, что случайная погрешность результатов измерений  $\Delta$  находится в некотором симметричном интервале  $(-\Delta_{r1}, \Delta_{r1})$ ,

определяется следующим выражением при подстановке в него значения плотности вероятности  $\rho(\Delta) = 1/(2\Delta_m)$ :

$$P(-\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r1}) = \int_{-\Delta_{r1}}^{\Delta_{r1}} \rho(\Delta) d\Delta = \frac{1}{2\Delta_m} \int_{-\Delta_{r1}}^{\Delta_{r1}} d\Delta = \frac{\Delta_{r1}}{\Delta_m}.$$

На графике (рис. 6.2) площадь заштрихованного прямоугольника с основанием  $2\Delta_{r1}$  и высотой  $1/(2\Delta_m)$  численно равна вероятности.

Для равномерного закона, симметричного относительно центра  $\Delta = 0$ , расчет СКО  $\sigma$  случайной погрешности выполняется с помощью известного из теории вероятностей выражения для дисперсии случайной величины:

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 \rho(\Delta) d\Delta} = \sqrt{\frac{1}{2\Delta_m} \int_{-\Delta_m}^{\Delta_m} \Delta^2 d\Delta} = \sqrt{\frac{\Delta_m^2}{3}} = \frac{\Delta_m}{\sqrt{3}}.$$

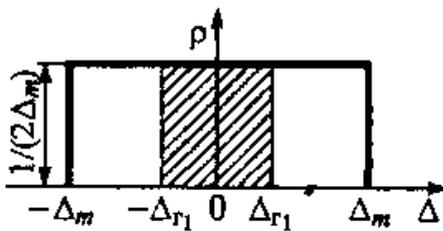


Рис. 6.2

Изменение напряжения питания вследствие постепенного разряда гальванических источников тока можно приближенно считать линейной функцией времени. Можно считать равномерным распределение погрешности от изменения температуры окружающей среды для приборов, работающих в цеховых или лабораторных условиях при односменной работе.

Равномерное распределение имеют: погрешность квантования в цифровых приборах, погрешность округления при расчетах, при отсчете показаний аналоговых приборов, погрешность от трения в стрелочных приборах с креплением подвижной части на кернах и подпятниках, а также в самоуравновешивающихся мостах и потенциометрах со следящим электромеханическим приводом, погрешность определения момента времени для каждого из концов временного интервала в электронных цифровых хронометрах и частотомерах.

#### 4. Треугольный закон распределения (закон Симпсона)

Он характерен для случайных погрешностей цифровых приборов, в которых измеряемая величина преобразуется в пропорциональный интервал времени  $T_{сч}$ , называемый временем счета, а измерение этого интервала выполняется с помощью счетных импульсов стабильного генератора, имеющих период следования  $T_0$ . В связи со слу-

чайным положением счетных импульсов относительно интервала  $T_{сч}$ , а также случайным соотношением между периодом  $T_0$  и временем счета  $T_{сч}$  треугольный закон представляет собой композицию (объединение) двух равномерных законов с одинаковыми по величине максимальными погрешностями  $\Delta_m$ .

Функция распределения одномерной плотности вероятности случайных погрешностей для треугольного закона (рис. 6.3) задается следующими соотношениями:

$$\rho(\Delta) = \begin{cases} \frac{\Delta_m + \Delta}{\Delta_m^2}, & -\Delta_m \leq \Delta \leq 0; \\ \frac{\Delta_m - \Delta}{\Delta_m^2}, & 0 \leq \Delta \leq \Delta_m; \\ 0, & -\Delta_m > \Delta; \Delta > \Delta_m. \end{cases}$$

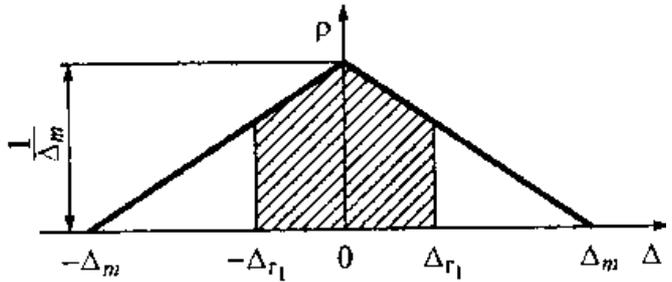


Рис. 6.3

Для этого закона вероятность того, что погрешность измерения  $\Delta$  располагается в интервале  $(-\Delta_{r1}, \Delta_{r1})$

$$P(-\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r1}) = 2 \int_0^{\Delta_{r1}} \left( \frac{\Delta_m - \Delta}{\Delta_m^2} \right) d\Delta = 2 \left( \frac{\Delta_{r1}}{\Delta_m} \right) - \left( \frac{\Delta_{r1}}{\Delta_m} \right)^2.$$

Заштрихованная область численно равна вероятности, определяемой по последней формуле.

В практике радиоизмерений используют и другие законы распределения погрешностей (например, трапецеидальный, арксинуса и др.). В частности, трапецеидальный закон является композицией двух равномерных с различными значениями максимальных погрешностей  $\Delta_m$ . Если трапецеидальный закон распределения неизвестен, то обычно применяют модель равномерного распределения погрешностей.

Суммируясь между собой, эти погрешности образуют трапецеидальные распределения с разным отношением оснований трапеции. Так, например, общая погрешность протяженности временного интервала в электронных цифровых частотомерах оказывается распределенной по треугольному закону Симпсона, так как образуется из двух равных, равномерно распределенных погрешностей определения его концов.

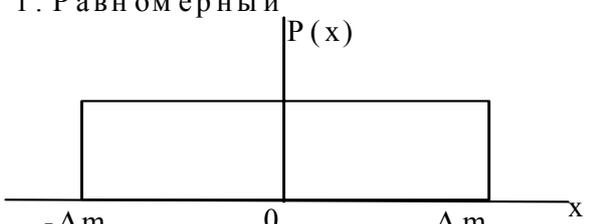
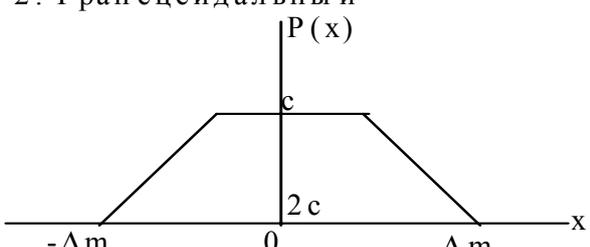
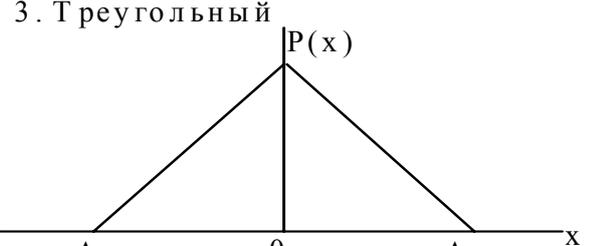
### 5. Арксинусный закон распределения

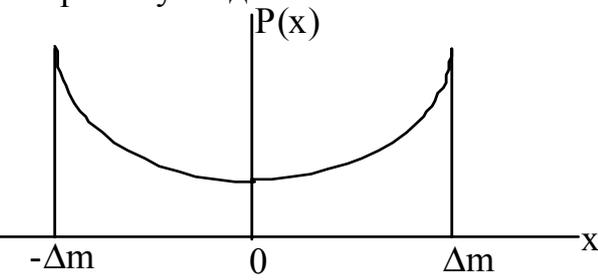
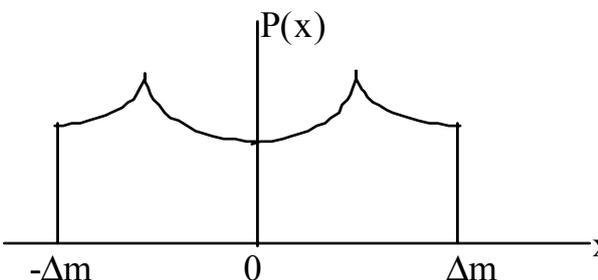
Одна из составляющих погрешности, характерной для электрических средств измерений, – погрешность от наводки на входе прибора или линии связи синусоидального напряжения силовых цепей с частотой 50 и 400 Гц. Эта помеха, складываясь с полезным сигналом, создает, как правило, аддитивную погрешность и в ряде случаев ограничивает порог чувствительности измерительного устройства. Распределение такой погрешности называется арксинусоидальным. Распределение суммы двух синусоидально изменяющихся во времени с разными частотами величин является композицией двух арксинусоидальных распределений. Если они имеют разные размахи, то их композиция имеет два пика.

В общем случае погрешность результата измерения представляет собой сумму систематической  $\Delta_c$  и случайной  $\Delta$  погрешностей. При этом рассеяние значений случайной погрешности происходит относительно некоторого центрального значения, равного величине систематической погрешности.

Характеристики различных распределений представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Вид распределения	$\Delta m / \sigma$
1. Равномерный 	$\sqrt{3} \approx 1,73$
2. Трапецеидальный 	$\sqrt{4,8} \approx 2,19$
3. Треугольный 	$\sqrt{6} \approx 2,45$

Вид распределения	$\Delta_m / \sigma$
4. Арксинусоидальный 	$\sqrt{2} \approx 1,41$
5. Композиция арксинусоидальных 	$4/\sqrt{5} \approx 1,79$

В табл. 6.2  $\Delta_m$  – максимальная погрешность центрированной погрешности.

Законы распределения погрешностей с центром  $\Delta_c$  представлены на рис. 6.4.

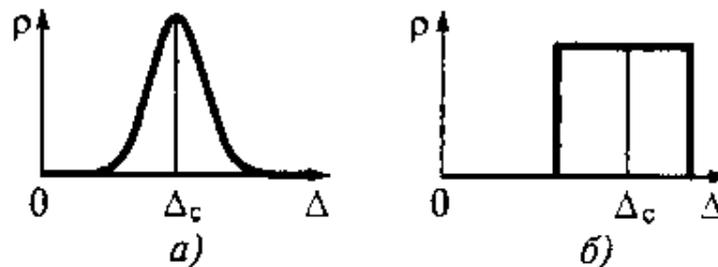


Рис. 6.4

Для количественной оценки систематической составляющей погрешности измерений  $\Delta_c$  и рассеяния случайной погрешности  $\Delta$  обычно используют две числовые характеристики случайной величины – математическое ожидание  $M(\Delta)$  и дисперсию  $D = \sigma^2$  соответственно:

$$M(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \rho(\Delta) d\Delta; \quad D(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} (\Delta - M(\Delta))^2 \rho(\Delta) d\Delta.$$

Для оценки величины разброса случайных погрешностей относительно центра, т.е. ширины распределения, на практике используют различные приемы, приводящие к существенно разным результатам. «Предельная», или «максимальная» оценка случайной погрешности теоретически справедлива только для ограниченных распределений (равномерного, трапецеидального, треугольного, арксинусоидального и т.п.). Для этих распределений действительно существует такое значение  $\pm\Delta_m$ , которое ограничивает с обеих сторон возможные значения случайной величины. Однако эти распределения являются лишь теоретической идеализацией. Главный недостаток такой оценки – бессмысленность арифметического суммирования «предельных» значений, так как получаемая сумма может превышать действительные погрешности в несколько раз.

На основании этого вводится понятие квантильных оценок погрешности, т.е. значений погрешности с заданной доверительной вероятностью  $P_d$ , как границ интервала неопределенности, на протяжении которого встречается  $P_d \cdot 100$  % всех значений погрешности,  $(1 - P_d) \cdot 100$  % общего числа их значений остаются за границами этого интервала.

В теории и практике оценки надежности средств автоматики, электронной и измерительной техники общепринятая доверительная вероятность равна 0,9. Удобней всего доверительную погрешность снабжать индексом, численно равным принятой доверительной вероятности, т.е. писать, например,  $\Delta^{0,90}$  при  $P_d = 0,9$ ,  $\Delta^{0,95}$  при  $P_d = 0,95$ .

Доверительная погрешность обладает тем уникальным свойством, что для широкого класса наиболее употребительных законов распределения вероятностей только она имеет однозначное соотношение со средним квадратическим отклонением в виде  $\Delta^{0,9} = 1,6\sigma$  вне зависимости от вида распределения, поэтому при отсутствии данных о виде закона распределения для определения двусторонней доверительной вероятности рекомендовано использование только  $P_d = 0,9$ . Практическое определение  $\Delta_d$  сводится к тому, что из всех полученных отсчетов отбрасываются наиболее удаленные от центра, а следовательно, самые ненадежные отсчеты. Если при переменной  $N$  (коли-

чество измерений) отбрасывается постоянная относительная доля всех отсчётов, то определяемое по крайним членам оставшегося вариационного ряда значение  $\Delta_d$  в отличие от  $\Delta_m$  с ростом длины  $N$  не возрастает, а стабилизируется и оказывается тем более устойчивым, чем больше объём выборки  $N$ , при этом не уступает по простоте определения «максимальному» значению  $\Delta_m$ . При этом следует иметь в виду, что по ограниченным экспериментальным данным мы получаем не точные доверительные значения, а лишь их приближённые значения – оценки. Достоверность квантильных оценок резко повышается с понижением значений  $P_d$ , а при постоянном  $P_d$  – с ростом числа отсчётов  $N$ , поэтому квантильные оценки с большими доверительными вероятностями могут быть найдены только при большом числе отсчётов.

Располагая рядом из  $N$  отсчётов и отбрасывая с каждого из концов ряда по  $N_{\text{отб}}$  отсчётов, можно определить погрешность с доверительной вероятностью, не большей чем  $P_d \leq (N-1) / (N+1)$ . Отсюда число отсчётов  $N$ , необходимое для определения по экспериментальным данным с заданной вероятностью  $P_d$ , будет не меньше чем  $N \geq (1+P_d+2N_{\text{отб}}) / (1-P_d) \approx [2(1+N_{\text{отб}})] / (1-P_d)$ . Для различных значений  $P_d$  и  $N_{\text{отб}} = 1$  необходимое число отсчетов приведено ниже:

$P_d$	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	0,997
$N$	20	40	80	200	400	800	1333

Таким образом, по экспериментальным данным легко определить значение  $\Delta_d$  лишь с доверительной вероятностью  $P_d \geq 0,95$  ( $N = 80$ ), а определение  $\Delta^{0,99}$  или  $\Delta^{0,997}$  практически трудноосуществимо (нужно  $N > 400$  и  $N > 1333$  соответственно).

Часто доверительные погрешности рассчитывают, вводя ничем не обоснованное предположение о том, что вид закона распределения погрешностей будто бы точно известен. В частности, используют прием, заключающийся в вычислении по небольшой выборке в 20 – 30 отсчетов оценки среднего квадратического отклонения  $\sigma$ , а затем указывают погрешность с доверительной вероятностью  $P_d = 0,997$ , равную  $\Delta^{0,997} = 3\sigma$ , на основании предположения о нормальности закона распределения. Однако такой прием не корректен.

## 6. Гистограммы

Выборки  $x_i, i = (1, \dots, n)$ , полученные в отдельных измерениях величины  $x$  при наличии случайных ошибок, можно представить на диаграмме в виде столбцов. При построении все выборки  $x_i$ , полученные в измерениях, следует расположить на небольших интервалах шириной  $\Delta x$ , а затем отложить число выборок  $N(x)$ , попавших в эти интервалы. Обычно размер интервалов выбирается по правилу  $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min}) / n^{1/2}$ , тогда число столбцов диаграммы  $K = n^{1/2}$ .

Для  $n < 25$  значение  $\Delta x$  лучше определить по правилу Старджеса (Sturges):

$$\Delta x = (x_{\max} - x_{\min}) / (1 + 3,3 \log n).$$

Если ширину интервала  $\Delta x$  выбрать слишком малой, то огибающая диаграммы будет сильно изрезанной. При слишком большом значении  $\Delta x$  огибающая оказывается квантованной очень грубо, и форма распределения проступает не так явно (рис. 6.5).

Можно построить нормализованную диаграмму, откладывая  $N(x)/n$ . Тогда по вертикали указывается относительное число измерений, результаты которых лежат в данном интервале. В этом случае можно утверждать, что по оси ординат отложена вероятность попадания результата измерения в данный интервал. Кроме того, можно провести нормализацию и по ширине интервала  $\Delta x$ , откладывая  $N(x)/(n\Delta x)$ . Диаграмму, получающуюся в результате нормализации, обычно называют *гистограммой*.

Если число выборок  $n$  растет, а диапазон  $x_{\max} - x_{\min}$  остается в ограниченных пределах, как это бывает на практике при измерении всех физических величин, то число интервалов, на которые разбивается этот диапазон, и число столбцов в гистограмме увеличивается, тогда как ширина одного интервала  $\Delta x$  уменьшается. При  $n \rightarrow \infty$  огибающая гистограммы переходит в гладкую кривую. Такая (дважды) нормализованная гистограмма является *плотностью распределения вероятностей*.

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{N(x)}{\Delta x}.$$

или

$$f(x) dx = \frac{N(x)}{n}.$$

Это означает, что  $f(x)dx$  есть вероятность того, что значение выборки попадает в интервал между  $x$  и  $x+dx$ ; отсюда и название «плотность распределения вероятности». Из последнего равенства следует, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1.$$

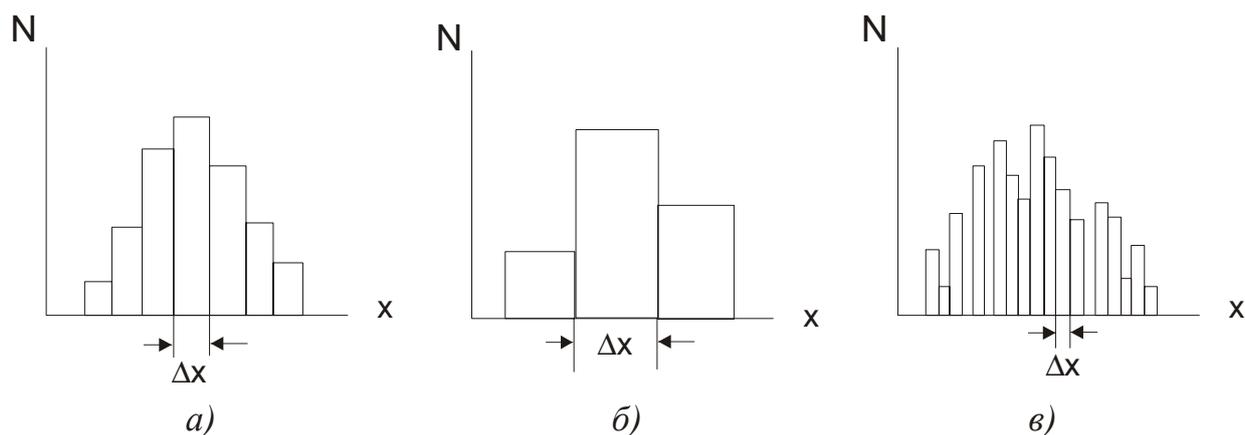


Рис. 6.5

На рис. 6.5, *а* показана диаграмма при правильном выборе ширины интервалов  $\Delta x$ , на которые разбивается весь диапазон возможных значений  $x$ ; на рис. 6.5, *б* – при слишком больших значениях  $\Delta x$ ; на рис. 6.5, *в* – при слишком малых значениях  $\Delta x$ .

Интеграл в этом выражении представляет собой сумму всех вероятностей  $f(x)dx$ . Он равен вероятности того, что очередная выборка попадет в первый интервал ширины  $dx$ , или во второй, или в третий и т. д. Так как результат измерения должен принадлежать одному из этих интервалов, сумма должна равняться единице. Последнее соотношение показывает, что единице равна площадь под плотностью распределения вероятностей (что и достигается главным образом путем двукратной нормализации). Зная плотность распределения вероятностей, легко найти вероятность того, что результат очередного измерения  $x$  окажется меньше определенного значения  $a$ . Обозначая эту вероятность  $P(x < a)$ , получим

$$P(x < a) = \int_{-\infty}^a f(x) dx.$$

### Контрольные вопросы

1. Когда применяется нормальный закон распределения погрешностей?
2. Какова для нормального закона распределения вероятность того, что случайная составляющая погрешности измерения не выйдет за пределы интервала  $\pm 3\sigma$ ;  $\pm 2,6\sigma$ ;  $\pm 2\sigma$  и  $\pm 1,6\sigma$ ?
3. Когда применяют закон распределения Стьюдента?
4. Как определить случайную погрешность для закона распределения Стьюдента?
5. Когда применяют равномерный закон распределения?

6. Когда применяют треугольный закон распределения (закон Симпсона)?

7. Когда применяют арксинусный закон распределения?

8. Как найти систематическую погрешность для смещенного закона распределения?

9. Что такое квантильные оценки погрешности?

10. Какая доверительная погрешность имеет однозначное соотношение с СКО вне зависимости от вида распределения?

11. Сколько нужно сделать отсчетов при отбрасывании двух для  $P_d = 0,9; 0,95; 0,99$ ?

*Задача.* Определить максимальную погрешность, если  $\sigma = 0,1N \%$  для законов распределения: равномерного, треугольного, арксинусного и нормального.

## **Лекция 7. ПОДГОТОВКА И ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

### ***1. Основные требования и критерии выбора***

Перед проведением эксперимента необходимо ответить на следующие вопросы.

**Для чего измерять?** С какой целью проводятся измерения и в каком виде нужен результат (числовой, допусковый, в виде характеристики)?

**Что измерять?** Какие характеристики (параметры) объекта являются информативными (основными) и насколько они стабильны?

**Как и чем измерять?** Какие могут быть использованы методы и средства?

**С какой точностью измерять?** Какая требуется точность, от чего зависят погрешности, как их можно исключить или уменьшить?

**Какой ценой измерять?** Каковы общие затраты и можно ли их уменьшить за счет использования специальных методик и инструментальных средств?

Получение необходимой измерительной информации с минимальными материальными и временными затратами требует внимательного подхода к подготовке измерений физических величин.

*Цель и задачи измерений* необходимо обосновать в самом начале эксперимента, они в каждом конкретном случае индивидуальны. Даже для простой задачи измерения выходного напряжения генератора может быть поставлено несколько целей:

- определить средний уровень сигнала;
- сравнить уровень с допустимыми границами;
- оценить максимальное или минимальное значение;
- определить нестабильность уровня и др.

Характер поставленной задачи существенно влияет на ход подготовки эксперимента и выбор всех его компонентов.

*Модель объекта* выбирают на основании тщательного анализа. При этом рассматриваются информативные, неинформативные и паразитные параметры объекта. Если, например, проводится измерение напряжения переменного тока, то необходимо знать форму, спектр, частоту и диапазон возможных значений сигнала. На качество измерений будут влиять нелинейные искажения, помехи и наводки. Предварительные сведения об измеряемой величине могут быть известны при постановке задачи измерений. Так, измеряя напряжение питающей сети переменного тока, мы знаем, что напряжение должно иметь синусоидальную форму, частоту 50 Гц и значение примерно 220 В с допустимым отклонением до 10 %. Реальное отклонение может превышать 20 %, допустимые нелинейные искажения составляют 5 %, нестабильность частоты – 2 %. Все это важно при выборе методик и средств измерений.

Отклонение параметров сигнала от заранее установленной модели (в частности отклонение напряжения сети от синусоидальной формы) может привести к неправильным результатам измерений. Если нет уверенности в адекватности модели, то следует уточнить ее, проведя ряд дополнительных измерений или выбрать СИ, показания которого не зависят от паразитных и неинформативных параметров объекта. При этом нужно учитывать, что модели одного и того же объекта измерений могут быть различными. Выбор той или иной модели диктуется задачами и условиями измерений. Так, измеряя сопротивление резистора, необходимо пользоваться различными его моделями в зависимости от диапазона частот тока, протекающего через

данный резистор. На высоких частотах следует учитывать влияние собственных емкостей и индуктивностей резистора, а на СВЧ – влияние поверхностного эффекта. Правильный выбор модели позволяет верно трактовать результаты измерений и обеспечивает при прочих условиях необходимую точность.

*Выбор метода измерений* определяется принятой моделью объекта и доступными СИ. При этом добиваются того, чтобы погрешность метода измерений, т.е. составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятых модели и метода измерений (иначе теоретическая погрешность), не сказывалась заметно на результирующей погрешности измерения, т.е. не превышала 30 % от нее. Различные методы измерений требуют разных затрат времени на выполнение наблюдений, поэтому необходимо учитывать и временные зависимости измеряемых величин. Изменения измеряемых параметров модели в течение времени измерения (выполнения цикла наблюдений), как правило, не должны превышать 10 % от заданной погрешности измерения. Если возможны альтернативы, учитывают и экономические соображения: ненужное завышение точности модели и метода измерения приводит к необоснованным затратам. То же относится и к выбору СИ. Таким образом, выбор метода измерений и СИ практически происходит одновременно.

*При выборе СИ* необходимо учитывать, что рабочие СИ предназначены для проведения технических измерений. По условиям применения они могут быть:

- *лабораторными*, используемыми при научных исследованиях, проектировании технических устройств, медицинских измерениях;
- *производственными*, используемыми для контроля характеристик технологических процессов, контроля качества готовой продукции;
- *полевыми*, используемыми непосредственно при эксплуатации самолетов, автомобилей, морских судов и т. п.

Выбор СИ определяется измеряемой величиной, принятым методом измерений и требуемой точностью результата измерений (нормами точности). Измерения с применением СИ недостаточной точности могут быть причиной неправильных выводов. Применение излишне точных СИ экономически невыгодно. Учитывают также диапазон изменений измеряемой величины, условия измерений, эксплуатационные качества СИ, их стоимость.

Основное внимание уделяют быстродействию и погрешностям СИ. При этом добиваются выполнения условия

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{мод}} + \Delta_{\text{м}} + \Delta_{\text{СИ}} + \Delta_{\text{УСЛ}} + \Delta_{\text{О}} \leq \Delta_{\text{д}},$$

где  $\Delta_{\text{мод}}$  – предельная погрешность модели измерений;  $\Delta_{\text{м}}$  – предельная погрешность метода измерений;  $\Delta_{\text{СИ}}$  – предельная погрешность средства измерений;  $\Delta_{\text{О}}$  – предельная погрешность оператора;  $\Delta_{\text{УСЛ}}$  – дополнительные погрешности, обусловленные воздействием влияющих факторов условий измерений;  $\Delta_{\text{д}}$  – предельно допустимая погрешность результатов измерений.

Этот критерий выбора СИ достаточно надежен, но дает завышенную на 20 – 30 % оценку суммарной погрешности измерения  $\Delta_{\Sigma}$ . Если такой запас по точности не допустим, суммирование составляющих  $\Delta_{\Sigma}$  следует произвести статистически. Необходимо также иметь в виду, что даже в области нормальных условий измерений погрешность СИ может изменяться на 35 %.

Рассмотрим основные факторы, которые следует учитывать при выборе СИ.

*Воздействие СИ на объект.* Средство измерений, подключаемое к объекту измерения, может существенно исказить измеряемую величину, что приведет к неверному результату измерения. Так, включая амперметр в измеряемую цепь, мы уменьшаем ток в этой цепи за счет сопротивления самого амперметра или, подключая термомпару для измерения температуры некоторого тела, мы изменяем температурный режим этого тела. Для уменьшения этого влияния необходимо, чтобы мощность, выделяемая на объекте средством измерений, была относительно небольшой.

Ориентировочно относительную погрешность, вызванную потреблением мощности  $P_{\text{и}}$  от измеряемого объекта, можно оценить формулой  $\Delta \leq P_{\text{и}}/P$ , где  $P$  – мощность, выделяемая на объекте измерения. В тех случаях, когда средство измерений выделяет на объекте некоторую мощность (при измерении параметров электрических цепей), также следует оценить влияние СИ на измеряемую величину. Например, при измерении малых сопротивлений двойными мостами постоянного тока через измеряемый объект протекает большой ток (5 А и более), что может вызвать нагрев объекта и изменение его сопротивления.

*Неполная адекватность принятой модели объекту измерений.* По возможности следует выбирать измерительные приборы, показания которых не зависят (или минимально зависят) от неинформативных параметров принятой модели измеряемой величины. В этом случае эксперимент может быть проведен меньшим числом приборов и с большей точностью.

Так, при необходимости измерить действующее значение переменного напряжения лучше выбрать, например, электронный вольтметр действующего значения, а не электронный вольтметр среднего значения, градуированный в действующих значениях. Последний при отличии формы кривой напряжения от синусоидальной дает неверные результаты измерений, для коррекции которых требуются дополнительные измерения, уточняющие модель объекта.

*Погрешности, вносимые средствами измерений.* Составляющими погрешности измерений (часто основными) являются погрешности, вносимые используемыми СИ. Они оцениваются по метрологическим характеристикам выбранных СИ. Не следует необоснованно применять СИ высокой точности, что приводит к усложнению и удорожанию эксперимента. Кроме того, при выборе СИ следует учитывать влияние внешних факторов (температуры, электромагнитных и электростатических полей и др.).

*Пределы измерений.* Для многих измерительных приборов погрешность измерения минимальна на верхнем пределе измерений. Руководствуясь этим, следует выбирать такие пределы измерения, при которых ожидаемые показания прибора будут находиться ближе к верхнему пределу. Например, измеряя напряжение 10 В двумя вольтметрами, имеющими одинаковые классы точности (1,0), но разные верхние пределы (15 и 150 В), получим относительные погрешности измерения, соответственно  $\pm 1,5$  и  $\pm 15$  %.

*Частотный диапазон.* Выбирая частотный диапазон СИ, необходимо обеспечить неискаженное прохождение сигналов измерительной информации. Для этого частотный диапазон СИ должен быть шире частотного спектра входных сигналов. С увеличением частотного диапазона возрастают помехи, поэтому не следует использовать СИ с необоснованно широким частотным диапазоном. При заметном влиянии помех наилучшими будут средства, которые при минимальном искажении сигналов измерительной информации максимально отфильтровывают помеху.

Рассмотренный перечень факторов, которые необходимо учитывать при выборе СИ, не является исчерпывающим. Он может быть дополнен требованиями быстродействия, исключения влияния внешних факторов, оптимального конструктивного исполнения и т.д. При подготовке эксперимента необходимо учитывать влияние на результаты измерения характеристик средства измерений, указанных в соответствующих НТД.

Следует иметь в виду, что, как бы тщательно ни был изготовлен и отрегулирован прибор к моменту выпуска его на приборостроительном заводе, с течением времени элементы схемы и механизм неизбежно устаревают, и погрешность его неуклонно возрастает, поэтому нормирование гарантированных в паспорте СИ пределов допускаемой погрешности проводится заводом-изготовителем с 1,25 – 2,5-кратным запасом на старение. Такое превышение пределов допускаемой погрешности над фактическим значением погрешности СИ в момент их выпуска из производства или из ремонта – по существу единственный практический способ долговременной метрологической стабильности средств измерений.

## ***2. Оптимальный выбор точности СИ***

До сих пор, говоря об области разброса исходных экспериментальных данных, мы принимали во внимание лишь погрешности средства измерений и неадекватность принятой модели. Но кроме этих двух факторов разброс данных вызывается еще и невоспроизводимостью от опыта к опыту, или диффузностью самого исследуемого явления, поэтому разброс исходных данных (обозначим его оценку  $\Delta_{ИД}$ ) всегда складывается из трёх составляющих:  $\Delta_0$  – диффузности объекта измерений,  $\Delta_M$  – погрешности адекватности модели,  $\Delta_{СИ}$  – погрешности средств измерений. Эти составляющие, как правило, можно считать некоррелированными, когда  $\Delta_{ИД} = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_M^2 + \Delta_{СИ}^2}$ . Для рационального выбора погрешности  $\Delta_{СИ}$  важно её соотношение с суммарной погрешностью объекта и модели:  $\Delta_{ОМ} = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_M^2}$ .

При этом возможно три случая.

1. Обычно экспериментатор стремится использовать как можно более точную аппаратуру с  $\Delta_{СИ} \leq \Delta_0$ . При этом результирующий разброс исходных данных  $\Delta_{ИД} = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_{СИ}^2} \approx \Delta_0$ , т.е. определяется диффузностью объекта. Таким образом, при  $\Delta_{СИ} \ll \Delta_0$  точность изме-

рений не может быть заметно повышена использованием более точных СИ. Единственным путём повышения точности остаётся статистическая обработка многократных отсчётов, поэтому повышение эффективности эксперимента в этом случае может быть достигнуто путём снижения точности используемых СИ, так как они становятся более дешёвыми.

2. При  $\Delta_{СИ} \approx \Delta_0$  погрешность исходных данных составляет

$$\Delta_{ИД} = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_{СИ}^2} \approx 1,4\Delta_0,$$

т.е. возрастает всего на 40 % по сравнению с тем, когда  $\Delta_{СИ} \ll \Delta_0$ .

3. При  $\Delta_{СИ} \gg \Delta_0$  погрешность исходных данных полностью определяется погрешностью  $\Delta_{СИ}$ , так как при этом

$$\Delta_{ИД} = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_{СИ}^2} \approx \Delta_{СИ}.$$

Сопоставив между собой все три случая, можно заключить, что для обеспечения наибольшей эффективности эксперимента нет смысла уменьшать случайную погрешность аппаратуры больше чем до  $\Delta_0/3$ . Кроме того, увеличивать объём выборки усреднённых наблюдений имеет смысл только до тех пор, пока величина суммарной случайной погрешности не будет сопоставима с погрешностью адекватности модели исследуемого явления или систематической составляющей погрешности СИ.

### ***3. Уменьшение систематических погрешностей***

С целью уменьшения систематических погрешностей возможно применение термостатирования, экранирования, виброзащиты и т.д. На этапе планирования и подготовки эксперимента принципиальным является выбор метода и средства измерений. Систематические погрешности, как правило, не проявляются при выполнении наблюдений и вычислении результатов измерений, но способны существенно исказить эти результаты.

При разработке СИ и МВИ, т.е. еще до начала измерений, систематические погрешности исключаются (например введением аддитивных и мультипликативных поправок), поэтому при выполнении наблюдений и оценке результатов измерений имеют дело с неисключенными остатками систематических погрешностей (НСП).

Для обнаружения НСП рекомендуется провести измерение другим, максимально отличным от использованного, методом и сравнить результаты; резко изменить условия наблюдений (использовать дру-

гие экземпляры СИ, сменить оператора, изменить время наблюдений, например провести их в ночное время, когда выключено технологическое оборудование); провести контрольное измерение в лаборатории другого предприятия или в метрологическом учреждении, в которых имеются более точные СИ и МВИ; выполнить теоретическую (расчетную) оценку НСП с привлечением знаний об объекте измерений, модели объекта измерений, методе и СИ. Для уменьшения (исключения) НСП в ходе выполнения измерений применяются следующие методы (приемы).

1. Метод замещения – замена измеряемой величины известной (мерой) притом так, чтобы при этом в состоянии и действии всех используемых СИ не происходило никаких изменений.

2. Метод противопоставления – измерение выполняется с двумя наблюдениями, проводимыми так, чтобы причина НСП оказывала разные, но известные по закономерности воздействия на результаты наблюдений.

3. Метод компенсации погрешности по знаку предусматривает измерение с двумя наблюдениями, выполняемыми так, чтобы НСП входила в результат каждого из них с разными знаками.

#### *Примеры*

Измеряется ЭДС с помощью потенциометра постоянного тока, имеющего паразитную ТЭДС. Проведя два наблюдения при противоположном направлении рабочего тока в потенциометре и взяв среднее значение, получим результат, свободный от этой погрешности.

Для исключения НСП из-за вариации, гистерезиса, мертвого хода верньерных механизмов измерения проводят при подходе к определяемому отсчету слева и справа. Результат измерения вычисляют по формуле

$$X = (X_{\text{СЛЕВА}} + X_{\text{СПРАВА}})/2.$$

4. Метод рандомизации (перевода систематической погрешности в случайную) заключается в такой организации измерений, при которой фактор, вызывающий НСП, при каждом наблюдении действует по-разному.

#### *Примеры*

Для исключения влияния магнитного поля Земли наблюдения повторяют несколько раз, поворачивая СИ каждый раз на некоторый угол (обычно одинаковый) относительно силовых линий поля. За результат измерения принимают среднее арифметическое из всех наблюдений.

В особых случаях для исключения субъективной систематической погрешности можно менять операторов после каждого наблюдения.

При определении положения главного максимума диаграммы направленности антенны, измерения методом вилки осуществляют на нескольких уровнях и при дальнейших вычислениях используют среднее арифметическое значение.

5. Метод симметричных наблюдений применяется для устранения прогрессирующих систематических погрешностей, линейно меняющихся пропорционально времени. Используют следующее свойство любых двух наблюдений, симметричных относительно средней точки интервала наблюдений: среднее значение линейно прогрессирующей погрешности результатов любой пары симметричных наблюдений равно погрешности, соответствующей средней точке интервала. Ряд наблюдений выполняют через равные промежутки времени и вычисляют средние арифметические значения результатов симметрично расположенных наблюдений (симметрично относительно среднего по времени наблюдения). Как было сказано, они должны быть равны. Это дает возможность контролировать в ходе измерения, соблюдается ли условие линейности возрастания систематической погрешности.

Описанные методы (приемы) должны учитываться при разработке МВИ.

#### **4. Требования к МВИ**

*Методика выполнения измерений* – это НТД, в которой установлена совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение необходимых результатов измерений.

Общие требования к разработке, оформлению, аттестации, стандартизации МВИ и метрологическому надзору за ними регламентирует ГОСТ Р 8.563 – 96 «ГСИ. Методики выполнения измерений». Одно из основных исходных требований при разработке МВИ – требование к точности измерений.

В МВИ должны устанавливаться:

- назначение, нормы точности и область применения МВИ;
- метод (методы) измерений;
- требования к СИ и вспомогательным устройствам, необходимым для выполнения измерений;

- требования к безопасности, включая экологическую безопасность;
- требования к квалификации операторов;
- условия выполнения измерений;
- операции подготовки к выполнению измерений;
- экспериментальные операции, выполняемые для получения результатов наблюдений при измерении;
- способы обработки результатов наблюдений и оценки показателей точности измерений;
- требования к оформлению и представлению результатов измерений.

Как правило, типовые МВИ оформляются в виде стандартов (или методических указаний) разной категории (государственных, ведомственных, конкретных предприятий) или разделов стандартов на:

- технологические процессы;
- методы испытаний и контроля качества продукции;
- методы и средства поверки СИ;
- программы метрологической аттестации СИ.

Могут разрабатываться и конкретные (не типовые) МВИ. В необходимых случаях выполняется метрологическая аттестация МВИ.

*Примечание.* При выполнении научных исследований МВИ в виде специального документа обычно не составляется. Ответственность за правильность организации и выполнения измерений и за их результаты несет в этом случае руководитель эксперимента.

Разработку или выбор МВИ начинают с анализа объекта, условий и цели измерений и установления соответствующей модели объекта измерений. Под моделью (содержащей физические, математические, структурные, смысловые и другие аспекты) объекта измерений (ОИ) понимают формализованное описание ОИ, основанное на совокупности уже имеющихся знаний об ОИ и достаточно однозначно и точно отражающее его свойства в рассматриваемых условиях и для поставленной цели. В качестве измеряемых величин следует выбирать такие параметры или характеристики модели ОИ, которые наиболее близко соответствуют цели измерения.

Неполная адекватность отражения моделью свойств объекта – источник принципиальных погрешностей модели, для оценки которых экспериментальными или расчетными способами необходимо использовать все имеющиеся возможности. Погрешностями модели можно пренебрегать, если они не превышают 10 % от допускаемой погрешности измерений.

### **5. Подготовка к измерениям и опробование СИ**

При подготовке к измерениям оператор должен:

1) ознакомиться с МВИ и последовательностью выполнения операций; проверить наличие необходимого комплекта СИ, вспомогательных устройств и материалов;

2) убедиться в том, что основные и вспомогательные СИ имеют действующие свидетельства о поверке (метрологической аттестации) или поверительные клейма, а вспомогательные устройства прошли регламентное обслуживание;

3) выполнить операции по созданию необходимых условий измерений, включая требования безопасности, например включить кондиционеры и по вспомогательным СИ убедиться в том, что в помещении (в зоне проведения измерений) установилась требуемая температура;

4) подготовить ОИ (например очистить) и создать необходимые (по НТД) условия измерений (испытаний): установить в рабочее положение, включить питание, охлаждение, прогреть его необходимое время и т.п.;

5) опробовать СИ; проверить действие органов управления, регулировки, настройки и коррекции; если СИ снабжены средствами самокалибровки (тестирования), выполнить соответствующие операции (это в первую очередь относится к автоматизированным ИС и ИИС);

6) провести 2 – 3 пробных наблюдения, сравнить результаты с ожидаемыми и при непредвиденно большом расхождении результатов проанализировать причины и устранить их.

### **6. Контроль условий выполнения измерений**

Для правильной организации измерений необходимо подобрать комплект СИ для контроля условий измерений; комплект технических устройств, обеспечивающих указанные в методиках условия измерений (условия испытаний) объекта; комплект устройств и материалов, необходимых для подготовки объекта испытаний и выполнения вспомогательных операций при измерениях, а также регистрации и оформления результатов измерений.

Сохранение указанных в эксплуатационной документации на СИ метрологических характеристик гарантируется для нормальных условий измерений, т.е. для номинальных значений основных влияющих физических величин. В ЭД на СИ указывают пределы

нормальной области значений влияющих величин, выходить за которые при выполнении измерений не рекомендуется из-за возникновения дополнительной погрешности СИ. Средства измерений влияющих величин выбирают такими, чтобы их погрешность не превышала 30 % от допустимых изменений влияющих величин. Например, если температура должна находиться в пределах  $(293 \pm 5)$  К, погрешность термометра не должна превышать  $\pm 1,5$  К. Соблюдение условий измерений контролируется периодически и каждый раз, когда возникают сомнения в результате наблюдения (измерения). Особенно опасны неожиданные, кратковременные изменения влияющих величин (например появление электромагнитных наводок). Они могут остаться незамеченными и исказить результаты. Обязателен также контроль выполнения требований безопасности и экологии по всем опасным и вредным факторам (физическим, химическим, биологическим, психофизиологическим).

### **7. Представление результатов**

Результаты, полученные в процессе измерений, подлежат обработке. Основные этапы:

- запись результатов, представление данных;
- учет и исключение систематических погрешностей;
- оценка и представление случайных погрешностей.

При этом наиболее типичны случаи прямого однократного измерения, прямого многократного измерения, косвенного измерения.

#### **Запись результатов**

Записывается столько значащих цифр, сколько позволяет получить отсчетное устройство РИП. Значащие – все цифры от первой ненулевой в результате:

1,5; 0,15; 0,0015;  $1,5 \cdot 10^{-12}$ ; 15 – две значащие цифры;

1,50;  $15,0 \cdot 10^6$  – три значащие цифры;

1,500; 15,00; 0,01500;  $150,0 \cdot 10^8$  – четыре значащие цифры.

Верными считают все знаки в числовом результате, достоверность которых не вызывает сомнения. Результат следует записывать так, чтобы значащих цифр было на одну больше, чем верных знаков.

При окончательной записи результата измерения, когда учтены все погрешности, необходимо указывать погрешность (абсолютную или относительную). Если она не указывается, то следует считать абсолютную погрешность данного числа равной  $\pm 1$  его последнего знака. Например,  $C = (2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^8$  м/с,  $C = 2998 \cdot 10^2$  км/с (округление с точностью до  $\pm 1$  последнего знака, т.е. до  $\pm 100$  км/с). Результаты измерений обычно записывают в виде таблиц. Графики строят по экспериментальным точкам так, чтобы он проходил плавно, изменяя направление возможно ближе ко всем точкам, а не просто соединяя их ломаной линией. При снятии функциональных зависимостей (ВАХ, АЧХ АХ) очень важно правильно выбрать экспериментальный шаг изменения аргумента функции.

### **Правила округления и записи результатов**

1. Числовое значение результата наблюдения округляют в соответствии с числовым разрядом значащей цифры погрешности измерений. Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

При округлении лишние цифры в целых числах заменяются нулями, в десятичных дробях – отбрасываются. Если десятичная дробь оканчивается нулями, они отбрасываются только до того разряда, который соответствует разряду погрешности. *Пример:* результат 1,072000, погрешность  $+0,0001$ . Результат округляют до 1,0720.

Если первая (слева направо) из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр меньше 5, остающиеся цифры не изменяются. Если первая из этих цифр равна 5, а за ней не следует никаких цифр или идут нули, то, если последняя цифра в округляемом числе четная или нуль, она остается без изменения, если нечетная – увеличивается на единицу. *Пример:* 1234,50 округляют до 1234; 8765,50 – до 8766.

Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр больше 5 или равна 5, но за ней следует значащая цифра, то последняя остающаяся цифра увеличивается на единицу. *Пример:* 6783,6 округляют до 6784; 12,34501 до 12,35.

2. Погрешность, возникающая в результате вычислений, не должна превышать 10 % суммарной погрешности измерений, поэтому если над результатами измерений предстоит произвести некоторые математические операции, то при округлении результатов в соответствии с правилом 1 добавляют один разряд справа, т.е. в первом примере результат 1,072000 нужно округлить не до 1,0720, а до 1,07200.

3. Определяя число знаков при вычислении погрешностей измерений, следует учитывать, что погрешность определения значения погрешности достаточно велика, порядка 30 % при  $n = 10$  и порядка 15 % при  $n = 20 \dots 25$ , поэтому при  $n < 10$  следует оставлять одну значащую цифру, если она больше трех, и две, если первая из них меньше четырех. При  $n \geq 10$  достаточно надежно оставлять во всех случаях две значащие цифры.

### **Представление и интерпретация результатов**

Результат измерения должен содержать не только полученное значение измеряемой величины, но и обязательно характеристики его погрешности с указанием числа наблюдений и доверительной вероятности. Вместо характеристик погрешности измерений можно дать ссылку на стандартизованную МВИ, по которой выполнялись измерения.

Допускается представление результата измерений доверительным интервалом, покрывающим истинное значение измеряемой величины с определенной доверительной вероятностью. В этом случае характеристики погрешности отдельно не указываются.

Совместно с результатами измерений могут приводиться дополнительные данные и условия измерений, которые необходимы для практического их использования, например моменты времени, к которым относятся результаты измерений, сведения о принятой модели ОИ.

Наименьшие разряды значений результатов измерений должны быть такими же, как наименьшие разряды значений абсолютной погрешности измерений или значений границ, в которых находится абсолютная погрешность измерений или ее статистические характеристики. Характеристики погрешности выражаются числом, содержащим не более двух значащих цифр, так как *погрешность определения погрешности*, в лучшем случае, превышает 10 %.

Наиболее распространены следующие формы представления результатов измерений. При симметричной погрешности результат измерения представляют в форме  $\bar{A}, \pm \Delta, P$  или  $\bar{A} \pm \Delta, P$ . При несимметричной погрешности измерений – в форме  $\bar{A}, \Delta(P)$  от  $\Delta_{\text{Н}}$  до  $\Delta_{\text{В}}, P$ , где  $\Delta_{\text{Н}}$  и  $\Delta_{\text{В}}$  – значения нижней и верхней границы погрешности измерения.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как и почему при подготовке к измерениям учитывают модель объекта?
2. Как изменяется модель резистора на разных частотах?
3. Как выбирается метод измерений и СИ?
4. Какие факторы следует учитывать при выборе СИ?
5. Что такое диффузность объекта и как она влияет на выбор точности СИ?
6. Что делают для уменьшения систематических погрешностей?
7. Как обнаружить НСП?
8. Что делают для исключения НСП?
9. Что такое МВИ и что она устанавливает?
10. Что должен делать оператор при подготовке к измерениям?
11. Каковы требования к СИ для контроля условий измерений?
12. Назовите этапы и требования к обработке результатов, полученных в процессе измерений.

## **Лекция 8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

### ***1. Учет и исключение систематических погрешностей***

В процессе эксперимента для исключения или уменьшения систематических погрешностей могут использоваться специальные способы и приемы:

- периодическая калибровка и установка нуля;
- увеличение базы измерений;
- усреднение по результатам двух измерений снизу вверх и сверху вниз;
- рандомизация (перевод систематической погрешности в случайную, например за счет применения нескольких однотипных приборов с разной погрешностью градуировки шкалы и установки нуля);
- введение известных заранее поправок, которые могут прилагаться к паспорту прибора в виде таблиц, графиков, формул.

Неисключенный остаток систематической погрешности (граница НСП) может оцениваться следующим образом. Если составляющих  $m \leq 4$ , то единица НСП определяется по максимуму

$$\Delta Y_{\max} = \pm \sum_{i=1}^m \Delta Y_{i \max}.$$

Если  $m > 4$ , считают, что *неслучайные величины в пределах установленных границ могут находиться с равной вероятностью*. Тогда с вероятностью 0,95

$$\Delta Y_{\max} = \pm 2\sigma = \pm 2 \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta Y_{i \max}^2 / 3} \approx \pm 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta Y_{i \max}^2}.$$

Дополнительные рекомендации при оценке НСП:

- 1) если случайные погрешности пренебрежимо малы, то границами НСП полагают пределы (паспортные) допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений;
- 2) при отсутствии априорной информации о составляющих НСП принимают модели равномерных законов распределения;
- 3) погрешность шкалы измерительного прибора принимают равной  $\pm 0,5$  деления. Для цифровых приборов погрешность шкалы равна единице младшего разряда.

## 2. Оценка и представление случайных погрешностей

### Прямое однократное измерение

*Результат прямого однократного измерения физической величины*  $Y_{\text{изм}} = A$  – это показание, снятое непосредственно с используемого средства измерения.

*Погрешность результата измерения* включает погрешность СИ, погрешность использованного метода измерения и субъективную погрешность оператора. Каждая из этих составляющих может иметь неисключенные систематические и случайные погрешности.

Оценивание погрешностей прямых однократных измерений можно подразделить на точное и приближенное.

Рассмотрим методику *точной оценки*. Пусть число неисключенных систематических погрешностей равно  $m$  и каждая задана границами  $\pm \theta_i$ , или доверительными границами  $\pm \theta_i(P_j)$ , т.е. границами с известной доверительной вероятностью  $P_j = P_{\text{д}}$ . В этом случае *доверительная граница систематической составляющей результата измерения*  $\theta = \theta(P_{\text{д}})$  оценивается с задаваемой доверительной вероятностью  $P_{\text{д}}$  по одной из следующих формул:

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}; \quad \theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2(P_j)}{k_j^2}},$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от  $P_d$  и  $m$ , а  $k_j$  – коэффициент, зависящий от  $P_j$  и оцениваемый аналогично коэффициенту  $k$ .

Оценка *доверительной границы случайной погрешности результата измерения*  $\varepsilon = \varepsilon(P_d)$  с задаваемой доверительной вероятностью  $P = P_d$  выполняется в порядке, зависящем от вида представления случайных составляющих (погрешностей СИ, метода, оператора).

*Погрешность результата прямого однократного измерения*  $\Delta = \Delta(P_d)$  для известного значения оценки СКО  $S(A)$  оценивается по одной из формул:

$$\text{при } \theta/S(\tilde{A}) < 0,8 \quad \Delta = \varepsilon(P_d);$$

$$\text{при } \theta/S(\tilde{A}) > 8 \quad \Delta = \theta(P_d);$$

$$\text{при } 0,8 \leq \theta/S(\tilde{A}) \leq 8 \quad \Delta = K[\varepsilon(P_d) + \theta(P_d)].$$

Значения коэффициента  $K$  при величинах доверительной вероятности  $P_d = 0,95$  или  $P_d = 0,99$  определяются из табл. 8.1.

Таблица 8.1

$\theta/S(\tilde{A})$	0,8	1	2	3	4	5	6	7	8
$K$ при $P_d = 0,95$	0,76	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81
$K$ при $P_d = 0,99$	0,84	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Результат прямого однократного измерения величины записывается в форме  $Y_{\text{изм}} = \tilde{A} \pm \Delta(P_d)$ , где  $\tilde{A}$  – результат измерения;  $P_d$  – доверительная вероятность погрешности результата прямого измерения  $\Delta$ . Рекомендуется выбирать вероятность  $P_d = 0,95$ .

Рассмотрим особенности *приближенной оценки погрешностей результата прямого однократного измерения*. При такой оценке, как и при точной, необходимо перед началом измерений провести предварительную оценку составляющих погрешности результата и собственно погрешности измерения. Эта информация извлекается из опыта проведения подобных измерений, из нормативно-технической документации на используемые средства измерений, из научно-технических отчетов и других источников. Если оценка погрешности превышает допустимую, то следует выбрать более точное средство измерений или изменить методику измерения.

Допускается пренебрежение случайными погрешностями, если доказано, что граница  $\theta$  неисключенных систематических погрешностей результата измерения больше СКО  $S(\tilde{A})$  случайных погрешностей в восемь раз и более.

В простейшем случае погрешность результата измерения равна пределу основной погрешности средства измерения  $\Delta_{СИ}$ , определяемой по нормативно-технической документации, если измерения проводились в нормальных условиях. При этом результат измерения можно записать в виде  $Y_{изм} = \tilde{A} \pm \Delta_{СИ}$ , т.е. без указания доверительной вероятности, которая подразумевается равной 0,95. Если же измерения проводились в условиях, отличающихся от нормальных, то следует определять и учитывать пределы дополнительных погрешностей, а затем суммировать их с основными. Порядок такого суммирования приведен в нормативных метрологических документах.

### **Прямое многократное измерение**

Необходимость многократных наблюдений некоторой физической величины возникает при наличии в процессе измерений значительных случайных погрешностей. В этом случае задача состоит в том, чтобы по результатам наблюдений найти оценку истинного значения и интервал, в котором находится сама величина с заданной вероятностью. Решение задачи достигается способом статистической обработки результатов наблюдений, основанном на гипотезе о распределении случайных погрешностей этих результатов по известному закону.

Многократные измерения позволяют уменьшить (отфильтровать) случайную погрешность. Для исключения погрешности необходимо бесконечное количество измерений. При ограниченном числе измерений находится лишь оценка случайной погрешности. Оценки – это случайные величины (в отличие от моментов), которые должны удовлетворять условиям состоятельности, несмещенности, эффективности.

Наиболее распространенной оценкой случайной погрешности является оценка среднеквадратического отклонения

$$\sigma^* = \sqrt{D^*} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{ЭКСП}i} - Y_{\text{СР}})^2 / (N - 1)},$$

где среднее арифметическое результатов наблюдений

$$Y_{\text{СР}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{\text{ЭКСП}i}.$$

Среднеквадратическая погрешность (оценка) среднего арифметического результатов измерений

$$\sigma^*_{Y_{\text{СР}}} = \sigma^* / \sqrt{N} = \sqrt{[\sum_{i=1}^N (Y_{\text{ЭКСП}i} - Y_{\text{СР}})^2] / [N(N - 1)]}.$$

То есть увеличивая  $N$ , случайную погрешность можно сделать пренебрежимо малой по сравнению с систематической. Такой прием называют фильтрацией случайной составляющей погрешности.

Дополнительно характеризуют случайную погрешность доверительная вероятность (коэффициент надежности) и доверительный интервал (интервальная оценка). Доверительная вероятность  $\alpha$  означает вероятность того, что результат измерений (действительное значение) отличается от истинного не более чем на  $\Delta$  :

$P(Y_{\text{СР}} - \Delta < Y_0 < Y_{\text{СР}} + \Delta) = \alpha$ , где  $Y_{\text{СР}} - \Delta \dots Y_{\text{СР}} + \Delta$  – доверительный интервал.

Для нормального закона распределения, выбрав  $\alpha=0,95$ , получим доверительный интервал в пределах  $\pm 2\sigma^* Y_{\text{СР}}$ . Погрешность  $\Delta^{0,9}$  обладает тем уникальным свойством, что для широкого класса наиболее употребительных законов распределения только она имеет однозначное соотношение со средним квадратическим отклонением в виде  $\Delta^{0,9} = 1,6\sigma$ , поэтому при отсутствии данных в виде закона распределения для определения доверительной вероятности предписывается использовать  $P_d = 0,9$ . Доверительная вероятность  $P_d = 0,99$  используется лишь при указании погрешности первичных и рабочих эталонов.

Доверительный интервал  $3\sigma^*$  используется для определения грубых погрешностей (промахов). Например, при  $N > 30$  всегда отбрасываются результаты, отличающиеся более чем на  $3\sigma^*$ , так как вероятность их появления 0,003. Это *правило трех сигм*.

## Оценка результата измерения

Предположим, что при выполнении  $n$  многократных наблюдений одной и той же величины  $x_{и}$  постоянная систематическая погрешность  $\Delta_c$  полностью исключена (равна нулю). Тогда результат  $i$ -го наблюдения  $x_i = x_{и} + \Delta_i$  находится с некоторой абсолютной случайной погрешностью  $\Delta_i = x_i - x_{и}$ .

При нормальном законе распределения погрешности за истинную величину  $x_{и} = A$  принимают ее оптимальную оценку в виде среднего арифметического значения (оценки математического ожидания) выполненного ряда наблюдений:

$$\tilde{x} = \tilde{A} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}.$$

Зная оценку истинного значения величины  $x_{и}$ , вычисляют абсолютную погрешность каждого из  $n$  наблюдений  $\bar{\Delta}_i = x_i - \tilde{x}$ . Далее находят оценку СКО, характеризующую точность метода измерений:

$$\tilde{\sigma} \approx \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_i^2}.$$

Затем вычисляют оценку СКО значения  $\tilde{x} = \tilde{A}$ , которая называется среднеквадратическим отклонением результата измерения. Данное СКО характеризует степень разброса значений по отношению к истинному значению и для различных  $n$  определяется по формуле

$$\tilde{\sigma}_{\text{ср}} = S(\tilde{A}) = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}}.$$

Из приведенных выражений и следует, что точность метода и результата многократных наблюдений  $n$  увеличивается с ростом числа последних. Если погрешность  $\Delta_i$  есть сумма случайной  $\Delta_i$  и постоянной систематической  $\Delta_c$  погрешностей, то оценка результата измерений будет иметь вид

$$\tilde{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = x_{и} + \Delta_c + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{n}.$$

Из этого выражения следует, что многократные наблюдения и увеличение их числа  $n$  не влияют на систематическую составляющую

погрешности результата измерений, но уменьшают случайную (за счет различных знаков отдельных реализаций), поэтому в случае, когда в результате многократных наблюдений преобладает систематическая погрешность (например при использовании прибора низкой точности), целесообразно ограничиться только одним измерением.

### Доверительные границы случайной погрешности

Оценка измеряемой величины – случайная величина и, следовательно, отличается от нее на некоторую погрешность. В связи с этим практический интерес представляет определение вероятности  $P_d$  того, что измеряемая величина  $x_n = A$  находится в заранее заданном доверительном интервале  $2\Delta_r$ , причем  $\pm\Delta_r$  – доверительные границы случайной погрешности результата измерения, а  $P_d$  – доверительная вероятность. Аналитически доверительная вероятность записывается в следующем виде:

$$P(\tilde{A} - \Delta_r \leq A \leq \tilde{A} + \Delta_r) = P_d.$$

Зная закон  $\rho(\Delta)$  плотности вероятности случайной погрешности, можно по заданному  $P_d$  найти доверительный интервал (и наоборот). При поиске доверительного интервала вероятность задают равной 0,90...0,99. Если число наблюдений  $n$  велико, то для расчета доверительной границы можно использовать выражение  $\Delta_r = k\sigma$ , где  $k$  – коэффициент, зависящий от закона и объема выборки.

### Границы НСП

Всегда остаются неисключенные систематические погрешности, определяемые с некоторой погрешностью. Обычно НСП при повторных измерениях с применением других приборов (аналогичного типа) изменяются, но остаются в заданных границах, поэтому подобные НСП принято рассматривать как случайные с равномерным симметричным законом распределения плотности вероятности и определять каждую границами  $\pm\theta_i$ . Причем в качестве границы  $\theta_i$  принимают, например, пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей используемых средств измерений.

Общую границу  $\theta = \theta(P_d)$  нескольких НСП вычисляют по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2},$$

где  $m$  – число неисключенных систематических погрешностей измерений,  $k$  – коэффициент, зависящий от  $m$ , принятой доверительной

вероятности  $P_d$  и соотношения между составляющими  $\theta_i$  (рисунок). Данная вероятность  $P_d$  должна быть равна той, которая была принята при расчете доверительной границы случайной погрешности результата измерения. На практике чаще всего задают доверительную вероятность  $P_d = 0,95$  и реже  $P_d = 0,9$  (табл. 8.2).

Коэффициент  $k$  можно выбирать в соответствии с  $m$  и графиками (см. рисунок), где  $l = \theta_1/\theta_2$  – отношение границ;  $\theta_1$  – максимальная граница;  $\theta_2$  – граница, ближайшая к  $\theta_1$ .

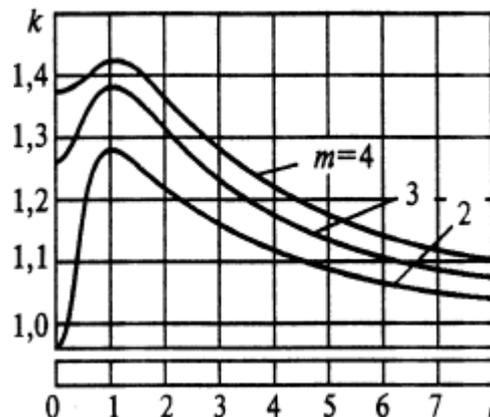


Таблица 8.2

$P_d$	$m$	$k$
0,95	—	1,1
0,99	$> 4$	1,4
	$\leq 4$	по графику $k(l) _m$ , рисунок на с. 76

### Границы погрешности результата измерения

В общем случае на погрешность результата измерения с многократными наблюдениями влияют случайные погрешности и НСП. Методика оценки следующая.

1. Пусть  $\theta$  – граница НСП,  $S(\tilde{A})$  – оценка СКО результата измерения, а  $\varepsilon = t(P_d, n)S(\tilde{A})$  – доверительная граница случайной погрешности результата измерения. Причем оценки  $\theta$  и  $\varepsilon$  выполнены при одинаковой доверительной вероятности.

2. Если  $\theta < 0,8S(\tilde{A})$ , то НСП пренебрегают, считая их несущественными по сравнению со случайными погрешностями, и полагают, что граница погрешности результата измерения  $\Delta = \varepsilon = t(P_d, n)S(\tilde{A})$ .

3. При  $\theta > 8S(\tilde{A})$  пренебрегают случайной погрешностью по сравнению с НСП и полагают, что граница погрешности результата измерения  $\Delta = \theta$ .

4. В случаях, когда  $0,8S(\tilde{A}) < \theta < 8S(\tilde{A})$ , границу погрешности результата измерения вычисляют по формуле  $\Delta = |\theta| + \varepsilon$ , где  $\theta$  – общая граница НСП,  $\varepsilon = t(P_d, n)S(\tilde{A})$  – доверительная граница случайной погрешности.

## **Краткая методика обработки результатов многократных измерений**

Предполагается, что наблюдения выполняются одним экспериментатором в одинаковых условиях, одним и тем же прибором.

1. Проводят  $N$  единичных измерений  $Y'_1 \dots Y'_N$ .
2. Исключают известные систематические погрешности из результатов и получают исправленные значения  $Y_1 \dots Y_N$ .
3. Находят среднеарифметическое и принимают его за результат измерений ( $Y_{cp}$ ).
4. Вычисляют оценку среднеквадратического отклонения результатов:
  - а) определяют  $\sigma^*$  (точность метода при единичном измерении);
  - б) находят относительное значение среднеквадратической погрешности  $\sigma_{отн}^* = \sigma^* / Y_{cp}$  (точность метода при единичном измерении).
5. Вычисляют оценку среднеквадратического отклонения результатов измерений  $\sigma_{cp.отн}^* = \sigma_{отн}^* / \sqrt{N}$  (это погрешность результата после обработки многократных измерений).
6. Проверяют гипотезу о том, что распределение результатов наблюдений нормальное (например построением гистограммы).
7. Вычисляют доверительные границы случайной погрешности:
  - а) их задают доверительной вероятностью, учитывая объем выборки  $N$ ;
  - б) вычисляют доверительные границы для данного закона распределения.

### ***3. Правила суммирования погрешностей***

Погрешности сложных измерительных приборов зависят от погрешностей отдельных узлов (блоков) так же, как и погрешности ряда систем и комплексов зависят от погрешности отдельных РИП, преобразователей, мер.

1. Систематические погрешности, если они известны или достаточно точно определены, суммируют алгебраически (т.е. с учетом собственных знаков).

Когда виды погрешностей не определены, их учитывают как случайные (рандомизируют).

2. Случайные погрешности (среднеквадратические оценки) суммируют с учетом их взаимных корреляционных связей. Например, для двух погрешностей

$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\sigma_1\sigma_2\rho}$ , где  $\rho \in (-1; +1)$  – коэффициент корреляции. На практике обычно принимают  $\rho = 0; -1; +1$ . При  $\rho = 0$  суммирование геометрическое. При  $\rho = \pm 1$  суммирование алгебраическое:  $\sigma_{\Sigma} = \sigma_1 \pm \sigma_2$ .

Некоррелированные погрешности (вызванные независимыми причинами) всегда суммируются геометрически:  $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}$ .

Чем больше  $n$ , тем ближе итоговое распределение к нормальному.

При оценке влияния частных погрешностей на результат используют критерий ничтожной погрешности: если вклад от составляющей  $i$ -й погрешности приводит к изменению суммарной не более чем на 5 %, то погрешность признается ничтожной.

Принимая во внимание, что  $\delta_{\Sigma}^2 = (\delta_{\Sigma k})^2 + \delta_i^2$ , критерий ничтожности имеет вид  $\delta_i \leq 0,3\delta_{\Sigma}$ . Иногда рассматривают совокупность ничтожных погрешностей

$$\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots} \leq 0,3\delta.$$

При округлении окончательного результата могут быть опущены одна малая составляющая, если она в пять раз меньше наибольшей из суммируемых составляющих; две составляющие, если они в семь раз меньше, и четыре составляющие, если они в восемь раз меньше наибольшей.

#### **4. Погрешности косвенных измерений**

Особенность косвенных измерений состоит в том, что величина  $A$ , значение которой надо измерить, является известной функцией  $f$  ряда других величин – аргументов  $x_1, x_2, \dots, x_m$ . Данные аргументы подвергаются прямым измерениям, а величина  $A$  вычисляется по формуле

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Таким образом, при косвенных измерениях искомое значение находится на основании известной функциональной зависимости по результатам прямых измерений. Определение погрешности базируется на двух теоремах.

*Теорема 1.* Если функциональная зависимость линейная:

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_g X_g,$$

где  $C_0, C_1, \dots, C_g$  – постоянные коэффициенты;  $X_1, X_2, \dots, X_g$  – измеряемые прямым путём аргументы; тогда абсолютные систематические погрешности суммируются с теми же коэффициентами:  $\Delta Y_{\text{сист}\Sigma} = C_1 \Delta X_1 + C_2 \Delta X_2 + \dots + C_g \Delta X_g$ , а среднеквадратическая погрешность находится по формуле

$$\sigma = \sqrt{C_1^2 \sigma_1^2 + C_2^2 \sigma_2^2 + \dots + C_g^2 \sigma_g^2},$$

где  $\Delta X_i$  – абсолютные систематические погрешности измерения  $X_i$ ;  $\sigma_i$  – среднеквадратические погрешности измерения  $X_i$ .

*Теорема 2.* Если функциональная зависимость представляет собой нелинейную дифференцируемую функцию  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_g)$ , тогда абсолютные систематическая и случайная погрешности определяются по формулам

$$\Delta Y_{\text{сист}} \approx \frac{dY}{dX_1} \Delta X_1 + \frac{dY}{dX_2} \Delta X_2 + \dots + \frac{dY}{dX_g} \Delta X_g = \sum_{i=1}^g \frac{dY}{dX_i} \Delta X_i,$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{dY}{dX_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{dY}{dX_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{dY}{dX_g}\right)^2 \sigma_g^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^g \left(\frac{dY}{dX_i}\right)^2 \sigma_i^2}.$$

Если погрешности коррелированы, тогда:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^g \left(\frac{dY}{dX_i} \sigma_i\right)^2 + 2 \sum_{i \neq j} \left(\frac{dY}{dX_i}\right) \left(\frac{dY}{dX_j}\right) K_{ij}},$$

где  $K_{ij}$  – корреляционный момент:  $K_{ij} = \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j$ .

Величину  $\rho$  выбирают равной единице при наличии корреляции или нулю, если её нет.

Необходимо отметить, что при косвенных измерениях ошибки вычислений должны быть на порядок меньше погрешностей непосредственных измерений аргументов, в противном случае надо учитывать погрешности вычислений как независимые составляющие.

## Доверительные границы случайной погрешности и неисключенных систематических погрешностей

При косвенных измерениях, как и при многократных наблюдениях прямых измерений, оценка результата измерения является случайной величиной и отличается от истинного значения, поэтому практический интерес имеет оценка доверительного интервала  $(\tilde{A} - \Delta_{\Gamma}, \tilde{A} + \Delta_{\Gamma})$ , в котором находится  $A_{И}$  с заданной доверительной вероятностью  $P_{д}$ , где  $\pm\Delta_{\Gamma}$  – доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения.

При условии распределения плотности вероятности погрешностей результатов измерения всех аргументов функции  $A = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  по нормальному закону граница  $\Delta_{\Gamma}$  вычисляется по формуле

$$\Delta_{\Gamma} = \varepsilon = t(P_{д}, n)S(\tilde{A}),$$

где  $t(P_{д}, n)$  – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности  $P_{д}$ ;  $S(\tilde{A})$  – оценка среднеквадратического отклонения случайной погрешности косвенного измерения.

Граница  $\theta$  неисключенных систематических погрешностей результата косвенного измерения вычисляется без учета знака по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \theta_i^2},$$

где  $\theta_i$  – заданные границы результатов измерений неисключенных систематических погрешностей аргументов;  $k$  – поправочный коэффициент, значения которого вычисляют с учетом задаваемой доверительной вероятности  $P_{д}$  для оценки значения  $\theta$ , а также числа  $m$  составляющих  $\theta_i$ .

### Границы погрешности результата косвенного измерения

Суммарные границы  $\pm\Delta$  погрешности результата косвенного измерения вычисляют с учетом границы НСП  $\theta$  и доверительной границы  $\varepsilon$  случайной погрешности в зависимости от отношения  $\theta/S(\tilde{A})$ , где  $S(\tilde{A})$  – оценка среднеквадратического отклонения случайной погрешности косвенного измерения. Порядок такого учета аналогичен соответствующему учету для однократных прямых измерений, где коэффициент  $K$  зависит от задаваемой доверительной вероятности ( $P_{д} = 0,95$  или  $P_{д} = 0,99$ ) и отношения  $\theta/S(\tilde{A})$  (табл. 8.3).

Таблица 8.3

$\theta / S(\tilde{A})$	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	7	8
$K$ для $P_d = 0,95$	0,81	0,77	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,81	0,81
$K$ для $P_d = 0,99$	0,87	0,85	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Результат косвенного измерения и его погрешность необходимо представлять в виде формулы

$$x_{\text{и}} = \tilde{A} \pm \Delta(P_d).$$

Отметим, что при однократных измерениях аргументов процедура определения результата косвенно измеряемой величины сохраняется такой же, как и при многократных измерениях.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие способы и приемы могут использоваться в процессе эксперимента для уменьшения систематических погрешностей?
2. Как приближенно оценивается НСП?
3. Приведите точную методику оценки НСП.
4. Как оценить погрешность результата прямого однократного измерения  $\Delta = \Delta(P_d)$  для известных значений оценки СКО  $S(\tilde{A})$  и НСП?
5. Как записывается результат прямого однократного измерения?
6. Когда погрешность результата измерения равна пределу основной погрешности СИ  $\Delta_{\text{СИ}}$ , определяемой по технической документации?
7. Когда возникает необходимость многократных измерений?
8. Каким образом многократные измерения позволяют отфильтровать случайную погрешность?
9. Что такое доверительная вероятность и доверительный интервал?
10. Каким образом можно исключить промахи из совокупности отсчетов?
11. Как правильно выбрать коэффициент  $k$  при оценке НСП?
12. Как найти границы случайной суммарной и систематической погрешностей многократных измерений?
13. Приведите методику обработки результатов многократных измерений.
14. Как правильно суммировать систематические и случайные погрешности?
15. Как оценить погрешность косвенных измерений, если функциональная зависимость представляет собой нелинейную дифференцируемую функцию?
16. Как вычисляют границы  $\pm\Delta$  погрешности результата косвенного измерения с учетом границы НСП и доверительной границы случайной погрешности?

## Лекция 9. ЭТАЛОНЫ И МЕРЫ

Воспроизведение *основной единицы* осуществляется путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии с определением единицы. Она воспроизводится с помощью государственных первичных эталонов. Например, единица массы 1 кг воспроизведена точно в виде платиноиридиевой гири, хранящейся в Международном бюро мер и весов в качестве международного эталона.

Воспроизведение *производной единицы* сводится к определению значения физической величины в указанных единицах на основании измерений других величин, связанных функционально с измеряемой величиной.

Существуют эталоны для воспроизведения как основных единиц системы, так и ряда производных единиц, например эталон единицы давления, эталоны единиц электрических величин: ЭДС, сопротивления, емкости, индуктивности и др. Создание эталонов производных единиц позволяет повысить точность, с которой передаются размеры этих единиц нижестоящим ОСИ. При создании эталонов производных единиц обеспечивается их связь с эталонами основных единиц.

Повышение точности воспроизведения единиц физических величин, как правило, связано с усложнением применяемых для этой цели устройств. Единица физической величины воспроизводится путем сложных операций с помощью эталонной установки в соответствии со строго определенной спецификацией. В принципе такие эталонные установки и применяемые чистые вещества могут быть воспроизведены в любом месте с одним только условием, чтобы они удовлетворяли требованиям, предусмотренным спецификацией. Однако известно, что результаты измерений, проведенных в различных местах с максимальной тщательностью, все же имеют некоторые расхождения. Это подтверждает и практика международных сличений национальных эталонов различных стран, эталонные работы в которых проводятся на высшем научном уровне.

Международные эталоны единиц физических величин хранятся в Международном бюро мер и весов. Однако вещественные эталоны могут портиться или изменяться во времени.

Хранение эталонов представляет собой сложнейший комплекс метрологических работ. С одной стороны, необходимо обеспечить максимальную сохранность эталона, с другой – значение единицы от эталона должно передаваться для использования в различных областях человеческой деятельности с необходимой точностью.

Государственные эталоны хранятся в метрологических институтах страны – центрах государственных эталонов. Для проведения работ с государственными эталонами назначаются особые ответственные лица – ученые-хранители эталонов.

Воспроизведение основных единиц Международной системы единиц (СИ) осуществляется с помощью государственных эталонов, т.е. в централизованном порядке. Воспроизведение дополнительных, производных, а в случае необходимости и внесистемных единиц осуществляется одним из двух способов, определяемых исходя из соображений технико-экономической целесообразности:

- 1) централизованно – с помощью единого государственного эталона;
- 2) децентрализованно – посредством косвенных измерений, выполняемых в органах метрологической службы с помощью ОСИ.

Способ централизованного воспроизведения применяется для большинства важнейших производных единиц СИ (ньютон, джоуль, паскаль, ом, вольт, генри, вебер и др.).

Способ децентрализованного воспроизведения применяется к производным единицам, размер которых не может передаваться прямым сравнением с эталоном, или когда поверки мер посредством косвенных измерений проще, чем их сравнение с эталоном, или когда обеспечивается необходимая точность. Когда для воспроизведения единицы требуется специально предназначенное оборудование, создаются поверочные установки высшей точности.

### ***1. Эталон единицы длины***

В 1889 г. метр был принят равным расстоянию между двумя штрихами, нанесенными на металлическом стержне X-образного поперечного сечения. Международный и национальные эталоны метра были изготовлены из сплава платины и иридия, отличающегося значительной твердостью и большим сопротивлением окислению. Погрешности сличения между собой платиноиридиевых штриховых метров находятся в пределах  $\pm 1,1 \cdot 10^{-7}$  м ( $\pm 0,11$  мкм), а так как штрихи имеют значительную ширину, существенно повысить точность этого сличения нельзя.

В 1895 г. Генеральная конференция по мерам и весам признала, что естественным свидетелем размера метра является длина световой волны монохроматического света. После изучения спектральных линий ряда элементов было найдено, что наибольшую точность воспроизведения единицы длины обеспечивает оранжевая линия изотопа криптона-86. XI Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла выражение размера метра в длинах этих волн как наиболее точное его значение.

На основе этого решения утверждено следующее определение. Метр – длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_{15}$  атома криптона-86.

Метр в длинах световых волн воспроизводится интерференционным методом на специальной установке с помощью лампы, заполненной изотопом криптона-86. С целью получения необходимых условий для излучения криптон охлаждают жидким азотом до 58 – 60 К. Возбуждение атомов криптона производят путем пропускания через него электрического тока.

Новый метод дал возможность снизить погрешность воспроизведения метра примерно до  $10^{-8}$  м, что позволило выразить результат измерений (в самом благоприятном случае) уже числом из восьми цифр. Кроме повышения точности измерения (там, где это необходимо) первичный эталон единицы длины дает возможность следить за постоянством платиноиридиевого эталона, ставшего теперь вторичным эталоном.

Новейшие достижения в измерении частот и длин волн привели к совпадающим определениям скорости света, точность которых ограничивается в основном воспроизведением метра согласно его существующему определению. Значения длин волн, полученные через измерение частоты и заданную скорость света, обладают большей точностью, чем та, которая может быть достигнута сличением с длиной волны эталонного измерения криптона-86.

Исходя из этих соображений на XVII Генеральной конференции мер и весов в 1983 г. было принято новое определение метра. Метр – это длина пути, проходимого в вакууме светом за  $1/299792458$  долю

секунды. Внедрение в практику нового определения метра позволит создать у нас в стране единый комплекс государственных эталонов времени, частоты и длины, который откроет возможности значительного повышения точности линейно-угловых измерений, дальнейшего развития астрономии, геодезии и других областей науки.

## **2. Эталон единицы массы**

Первоначально было намечено за единицу массы принять массу одного кубического дециметра воды при температуре 4 °С (при наибольшей плотности воды). Однако большие трудности воспроизведения единицы массы указанным путем привели к закреплению результата измерений в форме гири из сплава платины и иридия. Созданный одновременно с платиноиридиевым прототипом метра, прототип килограмма с аналогичными ему копиями до настоящего времени является носителем и воплощением единицы массы.

В состав государственного эталона килограмма входят:

1) копия международного прототипа килограмма – платиноиридиевый эталон, носящий знак № 12 и представляющий собой гирю в виде прямого цилиндра с закругленными ребрами диаметром и высотой 39 мм;

2) равноплечие призмные весы № 1 на 1 кг с дистанционным управлением, изготовленные фирмой «Рупрехт» и служащие для передачи размера единицы массы вторичным эталонам;

3) равноплечие призмные весы № 2 на 1 кг с дистанционным управлением, изготовленные «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» и служащие также для передачи размера единицы массы вторичным эталонам. Платиноиридиевый эталон килограмма № 12 был изготовлен в 1883 г. из металла той же плавки, что и международный прототип килограмма. Он хранится на кварцевой подставке под двумя стеклянными колпаками в стальном шкафу, помещенном в хранилище эталонов. Эталон хранится при атмосферном давлении, температуре  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха 65 %.

Чтобы предохранить износ эталона, с ним сличают только два эталона-копии один раз в десять лет. Размер единиц от первичного эталона к рабочим передается с помощью эталонов-копий.

Погрешность воспроизведения единицы массы эталоном килограмма составляет  $2 \cdot 10^{-9}$ . Таким образом, эталон килограмма позволяет записывать результат измерения массы в лучшем случае числом из девяти цифр.

### *3. Эталон единицы времени*

Ранее единицу времени определяли исходя из солнечных суток. Так как продолжительность солнечных суток в течение года изменяется, то определили средние солнечные сутки. За единицу времени принимали секунду, равную  $1/86400$  средних солнечных суток. Позднее обнаружили, что вращение Земли происходит неравномерно. Тогда в основу определения единицы времени положили период вращения Земли вокруг Солнца – тропический год. Размер секунды был определен как  $1/31556925,9747$  часть тропического года. Но поскольку тропический год тоже изменяется (на 5 с за 1000 лет), за основу был взят тропический год, отнесенный к определенному моменту времени: 12 ч 31 декабря 1899 г. Такое определение секунды было зафиксировано в Международной системе единиц в 1960 г.

В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение секунды, основанное на физическом явлении, которое позволяет более точно и стабильно воспроизводить ее размер. Секунда – 9 192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Колебания, получаемые при возбуждении цезия-133, оказались надежными хранителями единицы времени.

В соответствии с определением единицы времени воспроизведение ее осуществляется атомно-лучевыми часами. Электромагнитные колебания кварцевого генератора умножаются до частоты спектральной линии цезия, принятой за рабочую. В резонаторе атомно-лучевой трубки энергия высокочастотных колебаний поглощается атомами цезия. При отклонении частоты кварцевого генератора от номинального значения интенсивность переходов атомов и плотность атомного пучка на выходе трубки резко сокращается. Блок автоподстройки, связанный с трубкой, вырабатывает сигнал ошибки, возвращающий частоту кварцевого генератора к номинальному значению. Стабильность частоты атомно-лучевых цезиевых часов составляет  $10^{-11}$ .

Атомные генераторы, основанные на использовании атомарного водорода, позволяют еще на порядок повысить точность воспроизведения единицы частоты и времени. Менее точны, но более просты и дешевы рубидиевые генераторы. Их частоты и кратковременные нестабильности следующие:

$f_{\text{Cs}^{133}} = 9192\,631\,770 \text{ Гц}$	$\text{Cs} - 2 \cdot 10^{-11}$
$f_{\text{Rb}^{87}} = 6834\,682\,608 \text{ Гц}$	$\text{Rb} - 5 \cdot 10^{-11}$
$f_{\text{H}} = 1420\,405\,751,6 \text{ Гц}$	$\text{H} - 5 \cdot 10^{-13}$

Государственный эталон времени и частоты содержит два комплекта водородных квантовых генератора, пять генераторов с кварцевой стабилизацией, четыре комплекта делителей и аппаратуру сличения частот, в том числе международного сличения. Погрешность атомных часов составляет  $\pm(1 \dots 5)10^{-12}$  ( $\pm 1$  с за 30 000 лет).

#### **4. Эталон единицы силы электрического тока**

В соответствии с постановлением IX Генеральной конференции по мерам и весам принято следующее определение ампера. Ампер – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого круглого сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.

Точное измерение электрического тока осуществляют с помощью инструмента, носящего название токовых весов. К серьгам коромысла весов подвешены два одинаковых соленоида. Один из них – рабочий, другой служит для создания симметричной нагрузки на коромысло; рабочий соленоид помещается внутри неподвижного соленоида. Через эти два соленоида пропускается один и тот же ток. В результате взаимодействия соленоидов на подвижной соленоид действует сила, которая уравнивается силой тяжести гирь. Сила притяжения между катушками выражается формулой  $F = I^2 dM/dx$ , где  $M$  – известная взаимная индукция катушек, а  $x$  – известное расстояние между ними. Значение производной  $dM/dx$  определяется из геометрии катушек. С помощью токовых весов можно достичь погрешности порядка  $3 \cdot 10^{-6}$ . Токовые весы – это пример пассивного эталона (так как информация содержится в конструкции эталона).

#### **5. Эталон единицы температуры**

Генеральная конференция по мерам и весам определила кельвин как единицу термодинамической температуры, равную  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды – точки равновесия воды в твердой, жидкой и газообразных фазах.

Термодинамическая температурная шкала (шкала Кельвина) была предложена Кельвином еще в 1848 г. Воспроизведение термодинамической шкалы представляет большие трудности, поэтому VII Генеральная конференция по мерам и весам в 1927 г. приняла, а IX Генеральная конференция в 1948 г. утвердила Международную практическую температурную шкалу, воспроизводимую по реперным точкам. В дальнейшем числовые значения реперных точек уточнялись в целях максимально возможного согласования их с термодинамической шкалой. В 1968 г. Международным комитетом мер и весов принята новая Международная практическая температурная шкала, заменившая Международную практическую температурную шкалу 1948 г. (редакция 1960 г.).

Температуры по Международной шкале выражаются в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ), но они могут быть выражены и в кельвинах.

Определяющие постоянные (реперные) точки воспроизводят, реализуя состояние равновесия между фазами чистых веществ. Интерполяция между температурами постоянных точек проводится по формулам, служащим для установления связи между показаниями специфицированных аттестованных интерполяционных приборов и значениями Международной практической температурной шкалы.

В качестве постоянных точек применяют равновесия между двумя фазами чистых веществ, а именно: между жидкой и газообразной фазами (точки кипения) или между твердой и жидкой фазами (точки затвердевания). В трех случаях используют так называемые тройные точки, характеризуемые равновесием между твердой, жидкой и парообразной фазами водорода, кислорода и воды. Точность воспроизведения кельвина и градуса Цельсия неодинакова в различных интервалах температур. Наибольшая точность воспроизведения  $\pm 0,0002$  К (или  $^{\circ}\text{C}$ ) достигается в тройной точке воды 273,16 К (или  $+0,1$   $^{\circ}\text{C}$ ).

В качестве эталонных приборов применяют платиновый термометр сопротивления в диапазоне температур 13,81 К и 630,74  $^{\circ}\text{C}$ ; термометру платинородий-платина в диапазоне между 630,74 и 1064,43  $^{\circ}\text{C}$ .

### ***6. Эталон силы света***

Кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/с. Кандела наиболее точно воспроизводится при помощи эталонного устройства – полного излучателя.

Полный излучатель, называемый иногда абсолютно черным телом, представляет собой небольшую трубочку из окиси тория внутренним диаметром около 2,5 мм, погруженную в чистую платину. Платина в свою очередь находится в сосуде, спрессованном из порошка плавной окиси тория, окруженном порошком из окиси тория. Все это помещено во внешний сосуд из плавного кварца. Внешний сосуд окружен небольшим числом витков медной охлаждаемой водой трубки. По трубке пропускается ток высокой частоты (около 250 кГц), который нагревает платину до ее расплавления. Вместе с платиной нагревается и трубочка из тория. Свет излучается из полости трубочки через отверстие в верхней ее части. Яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины сравнивается с помощью фотометра с яркостью особых ламп накаливания, используемых в качестве вторичных эталонов.

Воспроизведению канделы приписана погрешность  $\pm 0,5$  % по результатам международных сличений.

### ***7. Эталоны дополнительных и производных единиц СИ***

Воспроизведение радиана осуществляется методом калибровки исходя из того, что сумма всех центральных смежных углов многогранной призмы равна  $2\pi$  рад ( $360^\circ$ ).

Государственный первичный эталон единицы плоского угла состоит из 36-гранной призмы, эталонной установки, включающей в себя фотоэлектрические автоколлиматоры с электронным цифровым отсчетным устройством, позволяющим выполнять измерения в пределах от  $-6''$  до  $+6''$ , и системы для установки и поворота многогранной призмы.

Цена отсчетного устройства автоколлиматора  $0,01''$ . Среднее квадратическое отклонение результата измерения не превышает  $0,02''$ . На многие производные единицы СИ также существуют государственные первичные эталоны, число которых непрерывно увеличивается.

### ***8. Эталон разности электрических потенциалов (напряжения)***

Первичный эталон разности электрических потенциалов снабжен электрохимическим эталонным элементом (нормальным элементом Вестона). Это специальный гальванический элемент, составные части которого строго подбираются по составу веществ и дозировки.

Бывают элементы насыщенные и ненасыщенные (таблица). В качестве основного вещества обычно используют раствор  $\text{CdSO}_4$  (сернокислого кадмия). Насыщенные элементы при рабочей температуре содержат нерастворенные кристаллы, а ненасыщенные свободных кристаллов не имеют.

Тип элемента	Класс точн.	ЭДС, В	Допуст. ток, мкА	Температура, °С	Дрейф $\Delta \epsilon$ за год, мкВ
Насыщенный	0,001	1,01859...1,01863	1	$20,0 \pm 0,5$	10
	0,002	1,01856...1,01866	1	$20,0 \pm 2,0$	20
	0,005	1,01850...1,01870	1	10 ... 40	50
Ненасыщенный	0,02	1,0186...1,0194	10	5 ... 55	200

При 20 °С погрешность по напряжению составляет  $3 \cdot 10^{-6}$  при оптимальных условиях, которые заключаются в том, что изменения температуры не превосходят  $10^{-3}$  К, отсутствует нагрузка и нет ни вибраций, ни тряски. У элемента Вестона очень длительное тепловое последствие. После того как он был нагрет до 30 °С, ему может понадобиться шесть месяцев, прежде чем напряжение на нем полностью стабилизируется и не будет отличаться более чем на 0,3 мкВ от его номинального значения при 20 °С. Кроме того, элемент Вестона будет со временем стареть, что приведет к увеличению его внутреннего сопротивления ( $R_i = 500 \dots 1000$  Ом) и уменьшению напряжения на несколько микровольт (в течение первых лет).

Для эталонов более низкого порядка достаточны зенеровские опорные элементы (стабилитроны). Через зенеровский элемент пропускают постоянный ток и поддерживают его при постоянной температуре. Он может обеспечить погрешность меньше  $10^{-5}$ . Зенеровские элементы особенно полезны в качестве переносимых эталонов, их часто применяют в портативной аппаратуре.

Уязвимость и сравнительно большая погрешность эталонных элементов заставляют искать эталоны напряжений, которые были бы более постоянными и легче воспроизводимыми. Результатом такого поиска стало использование *эффекта Джозефсона* в эталонах напряжения. Этот эффект, предсказанный в 1962 г. английским студентом Брайеном Джозефсоном, наблюдается в том случае, когда два сверхпроводника располагаются близко один от другого на расстоянии порядка  $10^{-9}$  м.

Обычно в качестве проводников используют тонкие пленки из свинца, охлажденные до температуры ниже точки перехода. Эти пленки разделены слоем окисла толщиной 1 нм. В этих условиях электроны имеют возможность совершить туннельный переход через образующийся контакт. Этот электрический туннельный ток помещают в высокочастотное электрическое поле (с частотой  $f_0$ ), направленное перпендикулярно по отношению к контакту. В результате зависимость тока от напряжения имеет ступенчатый вид. Эта зависимость характеризуется скачками тока при квантованных значениях напряжения  $V_j$ . Напряжение  $V_j(n)$ , соответствующее  $n$ -му скачку ( $n$  – целое число), зависит от частоты  $f_0$  по правилу  $V_j(n) = n f_0 (h/2q)$ , где  $h$  и  $q$  – фундаментальные физические постоянные, а именно:  $h$  – постоянная Планка,  $q$  – заряд электрона. Для целей метрологии значение  $2q/h$  принято равным 483597,9 ГГц/В. Соединяя контакты последовательно, можно получить напряжение порядка 10 мВ с погрешностью всего лишь  $4 \cdot 10^{-7}$  (при  $f_0 = 10$  ГГц и температуре 4 К).

### 9. Эталон электрического сопротивления

Эталонами электрического сопротивления являются образцовые резисторы на значения  $10^{-5} - 10^9$  Ом, намотанные проволокой из сплава, свойства которого в наименьшей степени зависят от температуры. Другое требование – малые значения собственной термоЭДС.

Пример такого сплава – эваном (evanohm), состоящий из 74 % никеля, 20 % хрома и 6 % алюминия и железа. Этот сплав обычно применяют для высокоомных эталонов (10 кОм). Для получения малых сопротивлений (1 Ом) часто используют манганин (86 % Cu, 12 % Mn, 2 % Ni) или константан (54 % Cu, 45 % Ni, 1 % Mn). Для манганина  $TKC \leq 0,002$  % на 1 °С. Эталон сопротивления высокого класса помещают в термостат, температуру в котором поддерживают с очень большой точностью. Они могут быть в виде однозначных мер



Рис. 9.1

или магазинов. Изготавливаются в виде катушек с бифилярной намоткой. Классы точности подобных элементов 0,002...0,001. Бифилярная намотка позволяет уменьшить индуктивность катушки (рис. 9.1).

Эталон сопротивления чувствителен к влажности и нагреванию за счет рассеяния энергии на самом эталоне. Низкоомные эталоны бывают снабжены двумя парами выводов: токовыми выводами и выводами для измерения напряжения. Это делается для того, чтобы

при измерении сопротивления избежать влияния сопротивления контактов и подводящих проводов. Можно достичь погрешности  $1 \cdot 10^{-6}$ .

Проволочные резисторы стареют и могут обладать большим дрейфом, поэтому в настоящее время эталоны сопротивлений основаны на так называемом квантовом эффекте Холла (открытом К. фон Клитцингом в 1980 г.). Этот метод позволяет привязать единицу электрического сопротивления Ом к неизменным физическим постоянным, подобно эффекту Джозефсона.

Квантовый эффект Холла наблюдается в том случае, когда полупроводниковая пластина, обладающая эффектом Холла, с большой подвижностью носителей заряда охлаждается до 1 К и помещается в сильное магнитное поле. Если через пластину пропускается ток величины  $I$ , то между ее гранями возникает ЭДС Холла  $V_H$ . У зависимости  $V_H$  от интенсивности магнитного поля имеются так называемые плато. Результирующие (квантовые) сопротивления Холла выражаются формулой  $R_H(N) = V_H(N)/I$ . Здесь  $R_H(N) = (h / q^2) / N$ , где  $N$  – целое число, а  $h$  и  $q$  – фундаментальные физические постоянные ( $h / q^2 = 25812,807$  Ом). Этот метод позволяет задать единицу электрического сопротивления с погрешностью  $2 \cdot 10^{-7}$ .

### ***10. Эталон емкости***

Эталоны емкости существуют в виде образцовых конденсаторов с малыми значениями ТКЕ. Диэлектрик конденсатора – полистирол, кварц, стирофлен, вакуум.

Из четырех коаксиальных цилиндров можно сконструировать конденсатор, емкость которого будет зависеть только от длины цилиндров. Такой конденсатор особенно удобен в качестве эталона емкости, так как необходимо определять точно только длину. Методами оптической интерференции это можно сделать с исключительной точностью. Такие цилиндрические конденсаторы, называемые конденсаторами Томпсона – Лампара (Tomпson – Lampard), позволяют достичь погрешности меньше  $10^{-8}$ . Неудобство заключается в том, что емкость мала (приблизительно 1,9 пФ на 1 м). В качестве эталонов низших порядков используют другие конфигурации электродов, обеспечивающие значения емкостей 10 – 100 пФ, но обладающие более высокими погрешностями.

## 11. Эталон индуктивности

Точные эталоны индуктивности создать трудно. Это обусловлено большим числом параметров, определяющих довольно сложную геометрию катушек и влияющих на точность задания индуктивности. Кроме того, погрешность увеличивается за счет потерь энергии, обусловленных сопротивлением провода, эффектов близости и вихревых токов. Катушки наматываются на каркас (обычно фарфоровый). Точность имеющихся в настоящее время эталонов индуктивности составляет примерно  $10^{-5}$ .

Для того чтобы сделать минимальное активное сопротивление, используют многожильные провода и специальные методы пайки. При этом достигается более равномерное распределение тока по сечению. Применяют провод типа литцендрат. Это медный многожильный провод с изолированными жилами.

## 12. Эталон затухания

Изготавливается обычно в виде четырехполюсников (Т, Н, П, мостовая, Т с перекрытием и другие схемы (рис. 9.2)). Эти схемы используют в измерительных приборах (ваттметры, вольтметры и др.), в генераторах.

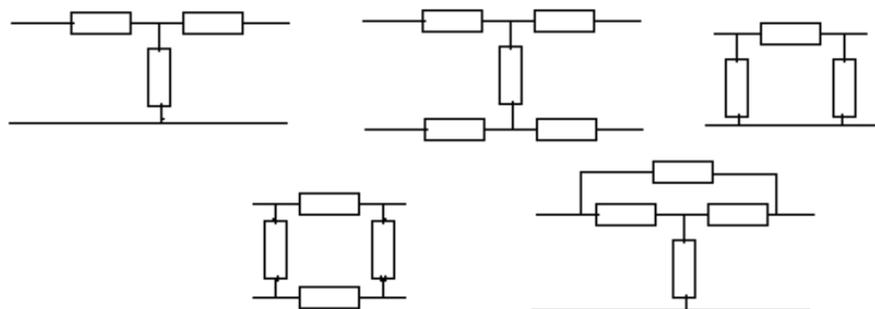


Рис. 9.2

Схемы резистивных мер затухания основаны на поглощении и рассеивании энергии. Диапазон частот обычно не превышает сотен мегагерц. В СВЧ диапазоне применяют эталонные меры поляризации или предельные.

Запредельный аттенюатор использует особенности запредельного волновода ( $\lambda \gg \lambda_{кр}$ ). На рис. 9.3 круглый волновод – запредельный, поле в нем убывает по экспоненте с постоянной затухания  $\alpha \approx \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} = \text{const.}$

Изменяя длину отрезка круглого волновода  $L$ , можно линейно (в дБ) изменять затухание  $A_{дБ} \sim L$ . Используя точный микрометр, можно с высокой точностью устанавливать требуемое значение (до 0,001 дБ).

Недостаток состоит в том, что аттенуатор не согласован по входу и выходу, поэтому обычно включают активные элементы затухания на входе и выходе. Они

обеспечивают дополнительное согласование. Начальное затухание при этом приблизительно равно 30 дБ, и за счет регулировки длины максимальное затухание может достигать 140 дБ.



Рис. 9.3

### Контрольные вопросы

1. К какой группе по условиям эксплуатации обычно относят эталоны и меры?
2. Каким образом эталоны воспроизводят основные и производные единицы?
3. Где хранятся государственные эталоны?
4. Какой была погрешность эталона единицы длины ранее и какова она сегодня?
5. Какова погрешность эталона единицы времени сегодня?
6. Что содержит государственный эталон времени и частоты?
7. Что собой представляет эталон единицы силы электрического тока?
8. Что собой представляет эталон разности электрических потенциалов (напряжения) и какова его погрешность?
9. Каковы недостатки элемента Вестона?
10. Для чего применяют зенеровские опорные элементы и какова их погрешность?
11. Какую погрешность обеспечивают эталоны на основе эффекта Джозефсона?
12. Что собой представляет эталон электрического сопротивления?
13. Что собой представляет эталон емкости?
14. Что собой представляют эталоны индуктивности?
15. Что собой представляет эталон затухания?

## Лекция 10. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Объекты измерения можно разделить на активные и пассивные. Для активного объекта (т. е. в случае, когда информация, которую предстоит получить об измеряемом объекте, активна) нужен эталон, чтобы измерить отношение величин сигналов объекта и эталона. Такой эталон должен давать хорошо известный сигнал той же размерности, что и измеряемый сигнал. Схема получения информации об объекте представлена на рис. 10.1: а – активный объект измерения – пассивная система измерения; б – пассивный объект измерения – активная система измерения.

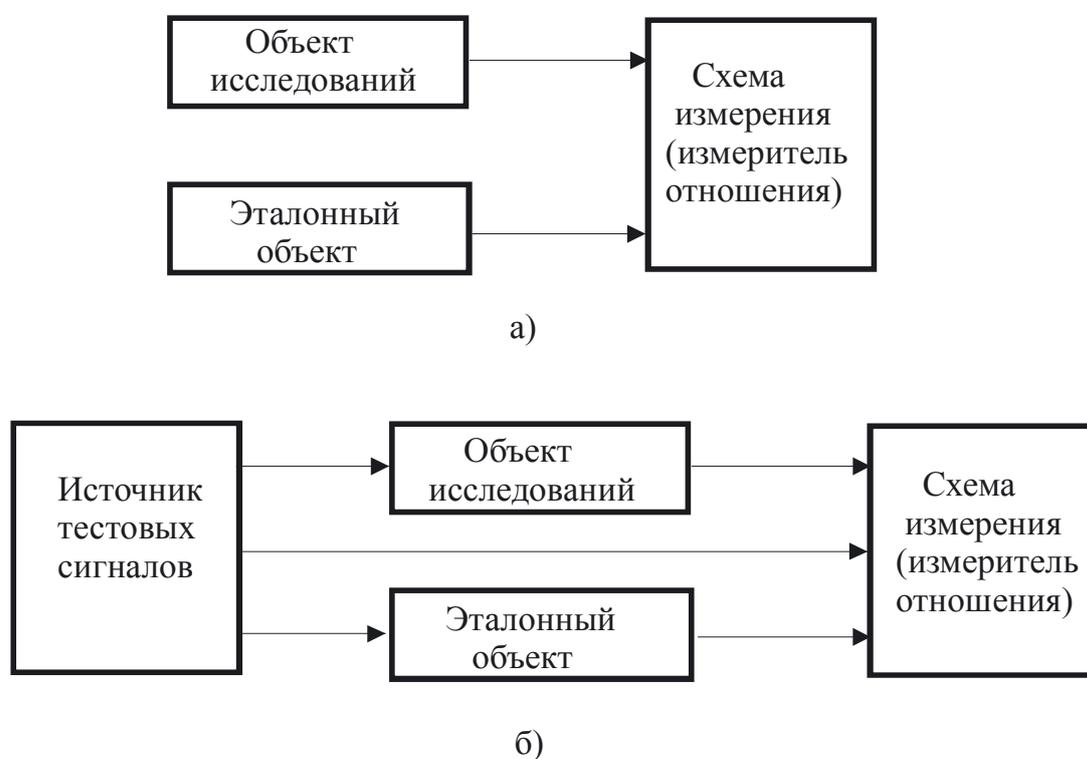


Рис. 10.1

Примеры активных эталонов – точные синтезаторы сигналов, источники опорного напряжения и т. д., тогда как измерительные преобразователи, аттенюаторы и калибровочные резисторы – пассивные эталоны.

К пассивной информации нет доступа, пока она не преобразована в активную форму. Для того чтобы сделать это, необходим какой-то источник энергии (источник электрического тока при измерении

резистора). С помощью энергии этого источника пассивная информация, имеющаяся в объекте измерения, становится активной – ток, текущий через резистор, вызывает появление на нем напряжения. Тогда активную информацию можно регистрировать имеющимися техническими средствами, т. е. с помощью измерительных средств.

Таким образом, для измерения пассивных объектов (т. е. в случае, когда измерительная информация, которую предстоит получить, содержится в объекте в пассивной форме) необходим внешний источник энергии, чтобы возбудить или активизировать соответствующие пассивные свойства данного объекта. Этот возбудитель оказывает воздействие на объект измерения который, в свою очередь так или иначе откликается на него. Если известно воздействие, то для того чтобы узнать свойства объекта, нужно лишь измерить отклик. Фактически отклик содержит активную информацию как об измеряемом объекте, так и о воздействии. Если воздействие не известно, то для извлечения той части пассивной информации, которая активизирована данным воздействием, необходимо осуществить измерение как отклика, так и самого воздействия.

Если при измерении с помощью используемых технических средств определяется отношение двух физических величин, то необходимо, чтобы они имели одну и ту же физическую размерность. При этом нужен эталон (мера), который характеризуется известным соотношением между воздействием и откликом. Такой пассивный эталон даст возможность проводить измерения с пассивным объектом, как показано на рис. 10.1.

Главное отличие активного РИП от пассивного – наличие стимулирующей части (источника тестового сигнала), которая может быть эталонной или хотя бы стабильной на время измерений.

### ***1. Источники погрешностей***

Чтобы в возможно большей степени уменьшить погрешности измерений, полезно иметь некоторое представление об их источниках. Рассмотрим источники возможных ошибок на основе схемы измерения (рис. 10.2).

Согласно схеме, состоящей из объекта, измерительной системы и наблюдателя, помещенных в определенную окружающую среду, объект и система взаимодействуют друг с другом: объект влияет на измерительную систему и наоборот, система оказывает воздействие на объект. Влияние объекта на систему желательно. Посредством его осуществляется перенос измерительной информации. Влияние системы на объект нежелательно, так как при этом измеряемая величина может заметно изменяться. В этом состоит *ошибка обратного влияния*. Необходимо попытаться согласовать входной каскад измерительной системы с объектом таким образом, чтобы свести ошибку обратного влияния к минимуму.

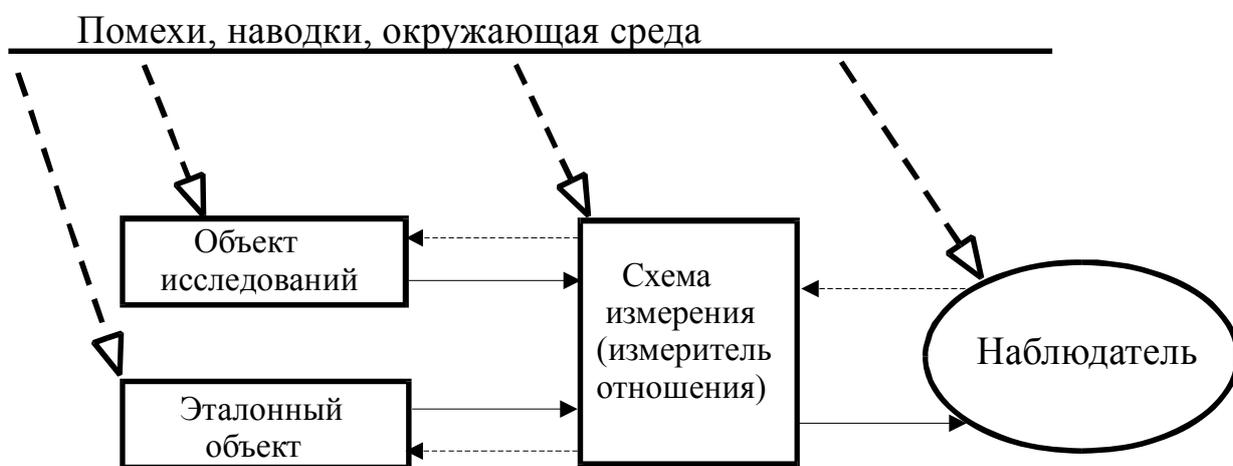


Рис. 10.2

На рис. 10.2 показано также взаимодействие между выходом измерительной системы и наблюдателем. Понятие «наблюдатель» употреблено здесь в широком смысле слова, включающем регистрацию результатов измерения не только человеком, но и ЭВМ. Здесь также взаимодействие измерительной системы и наблюдателя складывается из желательной и нежелательной составляющих. Воздействие измерительной системы на наблюдателя, т. е. передача наблюдателю результата работы измерительной системы, очевидно, является желательным. Обратное влияние может приводить к ошибкам, если характер воздействия наблюдателя на измерительную систему и степень этого воздействия оказываются такими, что результат измерения меняется.

Примеры ошибок такого рода – считывание показаний стрелочного прибора под углом, а не по направлению, перпендикулярному к шкале прибора, в результате чего возникает ошибка параллакса; нагружающее действие неодушевленного наблюдателя на выходные каскады измерительной системы. Чтобы уменьшить ошибки обратного влияния, необходимо осуществить сопряжение выходного каскада измерительной системы с наблюдателем.

Помимо рассмотренных взаимодействий измерительная система находится в двусторонней связи с окружающей средой. Когда характер и степень данного взаимодействия таковы, что окружающая среда существенно влияет на результат работы измерительной системы, это взаимодействие нежелательно, оно вызывает возмущения и помехи. Об этом источнике ошибок измерения говорят как о *возмущающем, или «мешающем» воздействии*.

Наконец, четвертый источник ошибок измерения – (несовершенные) характеристики самой измерительной системы. Если характеристики системы не соответствуют требованиям данного измерения, то измерения оказываются неправильными. Подбирая методики и СИ, можно минимизировать ошибки измерения такого рода.

В ходе измерения всегда в определенной степени оказывается воздействие на объект. Это может вызвать большее изменение измеряемой величины. Чтобы избежать этого, необходимо согласовать измерительную систему с измеряемым объектом. Обычно бывает достаточно подстроить только входную часть (входной каскад) измерительной системы. Согласования различают в зависимости от ситуации. Известно три типа: классическое согласование импедансов всех частей системы, сопряженное согласование и анэнергетическое согласование. При последнем варианте сводят к минимуму передачу энергии или мощности между объектом измерения и измерительной системой. В результате такого согласования в процессе измерения сколько-нибудь ощутимая энергия не передается на измеряемый объект и не потребляется от него. В некоторых случаях добиться этого позволяет компенсационный метод измерения.

## 2. Уравнение измерения – статическая характеристика прибора

В общем случае пассивный РИП преобразует измеряемую физическую величину (входной сигнал) в форму, доступную для непосредственного восприятия оператором, регистрации или принятия решения (рис. 10.3). Преобразование измерительной информации описывается статической (или градуировочной) характеристикой СИ и ее параметрами.

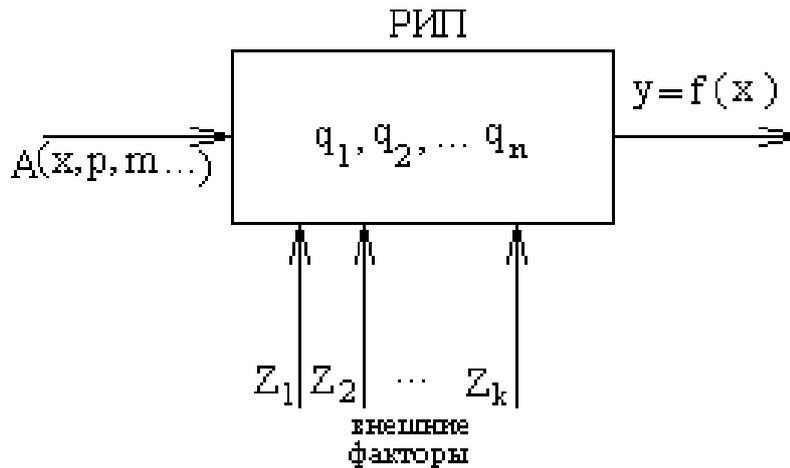


Рис. 10.3

Как правило, измерительный сигнал  $A$ , представленный в общем виде, содержит информацию не только о параметре  $x$ , который надо оценить, но также избыточную информацию о других параметрах ( $p, m, \dots$ ). Статической характеристикой называют функциональную связь между установившимся значением измеряемой величины  $x$  и выходным сигналом  $y$ . В общем случае  $y = f(p, x, m, \dots, q_1, q_2, \dots, z_1, z_2, \dots)$ , где  $q_1, \dots, q_n$  – внутренние параметры РИП (шумы, трение, термоЭДС);  $z_1, \dots, z_k$  – внешние параметры и воздействия (температура, давление, внешние поля, питание).

Заданная характеристика РИП  $y_o = f_o(x)$  устанавливает физическую взаимосвязь в идеальном виде. При этом уравнение измерения называется заданной статической характеристикой и  $y_o$  абсолютно точно отражает  $x$ .

Номинальная характеристика  $y_{\text{расч.ном}} = f(x, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{m0})$  определяет взаимосвязь при отсутствии дестабилизирующих факторов и номинальных параметров РИП.

Расчетная характеристика  $y_{\text{расч}} = f(x, q_1, q_2 \dots q_n)$  определяется параметрами РИП и внутренними дестабилизирующими факторами (паразитные ЭДС, наводки, утечки).

Экспериментальная характеристика  $y_{\text{эксп}} = f_{\text{эксп}}(x)$  – зависимость, полученная в результате испытаний образцов РИП.

Экспериментальная характеристика учитывает все факторы – внутренние и внешние. В этом случае погрешность  $\Delta = y_{\text{эксп}} - y_0$ .

Для широкого круга средств измерений статические характеристики имеют следующую аналитическую форму записи:

$$y_{\text{н}} = S_{\text{н}}x + y_{0\text{н}}; \quad y = Sx + y_0,$$

где  $S_{\text{н}}$  и  $S$  – номинальная и реальная чувствительности СИ;  $y_{0\text{н}}$ ,  $y_0$  – соответственно выходные величины при отсутствии и наличии аддитивной составляющей погрешности.

На рис. 10.4 представлены варианты отклонения реальной статической характеристики СИ от номинальной, вызывающие погрешности: а – аддитивную; б – мультипликативную; в – сумму аддитивной и мультипликативной.

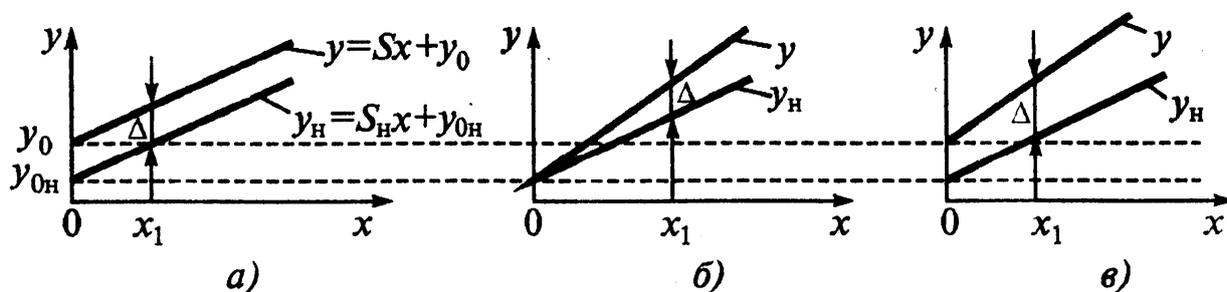


Рис. 10.4

Абсолютная погрешность СИ равна разности значений реальной и номинальной характеристик при том же значении измеряемой величины  $x$ :

$$\Delta = \Delta(x) = y(x) - y_{\text{н}}(x).$$

В общем случае абсолютная погрешность средств измерения  $\Delta$  (рассмотрим случаи, когда она положительна) состоит из аддитивной (суммируемой с измеряемой величиной) и мультипликативной (умножаемой на измеряемую величину) составляющих. Аддитивная составляющая не зависит, а мультипликативная зависит от измеряемой

величины  $x$ . Наличие в погрешности  $\Delta$  аддитивной и мультипликативной составляющих связано с характером отклонения реальной градуировочной характеристики СИ от номинальной.

При аддитивной составляющей

$$\Delta = \Delta(x) = y - y_H = y_0 - y_{0H} = a,$$

где  $a$  — постоянная, выраженная в единицах измеряемой величины.

При мультипликативной погрешности

$$\Delta = \Delta(x) = y - y_H = (S - S_H) = bx,$$

где  $b$  — постоянный коэффициент.

При сумме аддитивной и мультипликативной составляющих

$$\Delta = \Delta(x) = y - y_H = a + bx.$$

График абсолютной погрешности СИ общего вида  $\Delta = a + bx$  приведен на рис. 10.5, а для диапазона измерений  $0 \leq x \leq x_k$ , где  $x_k$  — конечное значение диапазона измерений;  $a$  и  $bx$  — соответственно аддитивная и мультипликативная составляющие.

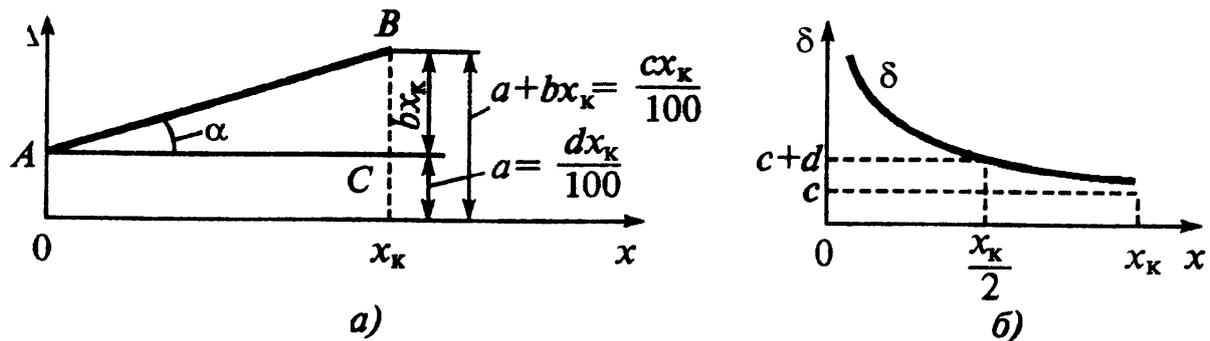


Рис. 10.5

Для построения соответствующего графика относительной погрешности (рис. 10.5, б) средств измерений  $\delta = 100\Delta/x_{и} = 100\Delta/x$  необходимо учитывать следующее обстоятельство. При оценке относительной погрешности принято значения аддитивной и суммарной составляющих абсолютной погрешности  $\Delta$  выражать в долях конечного значения диапазона измерений  $x_k$ . Причем в конце диапазона измерений эти составляющие должны быть соответственно равны:

$$a = dx_k / 100; \quad a + bx_k = cx_k / 100.$$

В этих формулах  $d = 100a/x_k$  и  $c = 100(a + bx_k)/x_k$  — коэффициенты, характеризующие точность СИ, равные относительным погрешностям (аддитивной и суммарной соответственно) при  $x = x_k$ .

При этом, как следует из рассмотрения треугольника  $ABC$ , коэффициент

$$b = \operatorname{tg}\alpha = BC/AC = (cx_k - dx_k)/100x_k = (c - d)/100.$$

С учетом данного значения  $b$ , а также величины коэффициента  $a$  выражение для относительной погрешности СИ принимает вид

$$\delta = 100 \frac{\Delta}{x} = 100 \frac{a + bx}{x} = c + d \left( \frac{x_k}{x} - 1 \right).$$

Из графика функции  $\delta$  (см. рис. 10.5, б) видно, что относительная погрешность СИ  $\delta$  увеличивается и изменяется по гиперболе при уменьшении измеряемой величины  $x$ , поэтому *следует выбрать такой диапазон измерений, в котором значение  $x$  близко к  $x_k$* . Рассмотренные выражения и графики для абсолютной  $\Delta$  и относительной  $\delta$  погрешностей СИ получены для частного варианта, когда  $\Delta > 0$ .

В практике измерений вполне возможно получение значения  $\Delta < 0$ , поэтому в общем случае выражения для абсолютной и относительной погрешностей СИ аналитически записываются со знаком « $\pm$ ».

Наряду с аддитивной и мультипликативной погрешностями средства измерений могут вносить и погрешности нелинейного характера, имеющие нелинейную зависимость от измеряемой величины (рис. 10.6).

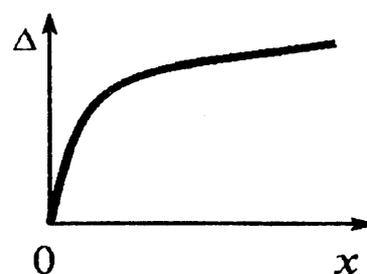


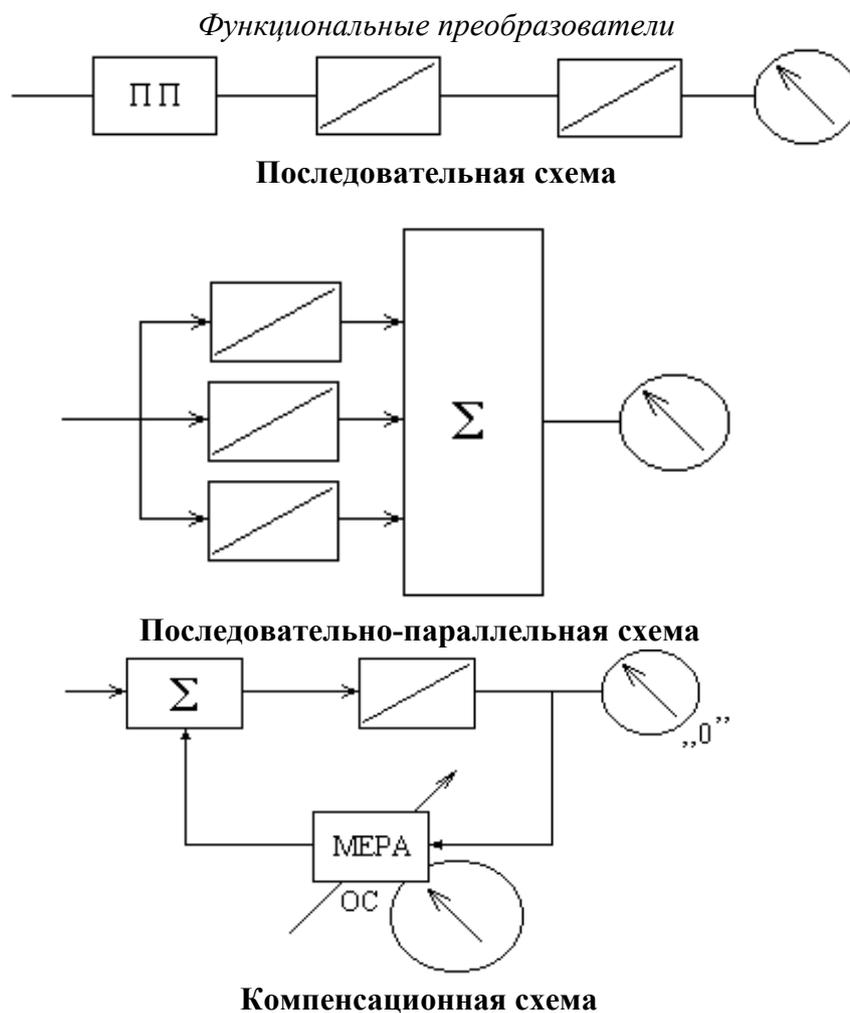
Рис. 10.6

### 3. Основные схемы пассивных РИП

По структуре РИП может быть с разомкнутым (последовательным или последовательно параллельным) и замкнутым соединением звеньев (компенсационные, имеющие обратную связь). Схемы реальных приборов могут содержать отдельные части, имеющие структуру каждого из трех приведенных вариантов схем (рис. 10.7).

Идеализированная структурная схема прибора с последовательным соединением модулей содержит первичный преобразователь (ПП), последовательно с которым включены другие преобразователи и индикатор. Здесь в качестве встроенной меры применен калиброванный канал передачи сигнала от входа прибора до его шкалы или сигнал образцового источника, включаемый на время калибровки на вход ПП. В последовательно-параллельной схеме сигналы группы параллельных преобразователей подаются на сумматор и далее на индикатор. Калибровка аналогична приведенному выше варианту.

Третий вариант схемы РИП реализует метод сравнения с мерой, которая включена в обратную связь. Это компенсационная схема. Здесь на сумматор приходят входной сигнал и сигнал, формируемый мерой. Индикатор «0» показывает равенство этих сигналов. Регулятор величины меры может при достижении «0» служить шкалой отсчета уровня входного сигнала. Можно также применять встроенный измеритель сигнала меры. Нередко на выходе меры включают калиброванный делитель сигнала (аттенюатор, делитель частоты и др.)



*Рис. 10.7*

Для компенсационного метода может потребоваться вспомогательный источник энергии, который поставлял бы точно столько же энергии, сколько в противном случае потреблялось бы от источника измеряемой величины. Компенсацией можно воспользоваться для

подавления возмущающих воздействий. В дифференциальном усилителе на паре биполярных транзисторов компенсация уменьшает влияние температурных изменений.

#### 4. Измерительные мосты

Мостовые методы используют для различных задач измерения сопротивления, емкости, индуктивности, добротности. На их основе строятся измерители температуры, перемещений, объема, скорости и другие устройства систем автоматики. Широкое применение мостовых схем обусловлено высокой чувствительностью и высокой точностью измерений. В зависимости от вида мосты делят:

- на мосты постоянного тока;
- мосты переменного тока;
- одинарные, или четырехплечие;
- двойные, или шестиплечие.

Для моста постоянного тока, приведенного на рис. 10.8, плечи образованы постоянными резисторами. Если  $R_1 = R_3$ ,  $R_2 = R_4$ , то в точках а) и б) потенциалы будут одинаковые и ток в цепи гальванометра отсутствует. Это условие баланса моста.

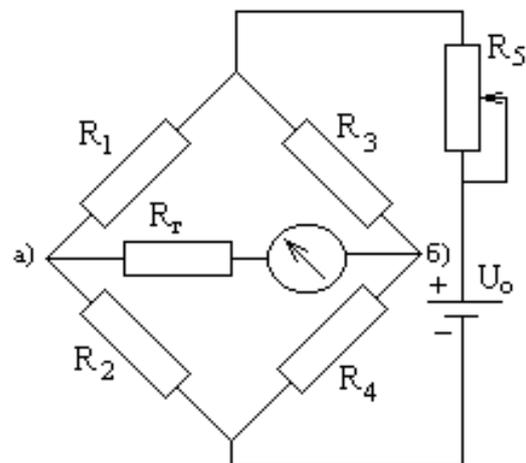


Рис. 10.8

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

Если одно из сопротивлений изменилось, то балансировка нарушается и в цепи диагонали моста появляется ток. Если одно из этих сопротивлений неизвестно, то, добившись балансировки моста, можно найти его достаточно точно. Если известное сопротивление изменилось на небольшую величину  $\Delta R_1$ , то изменение тока в цепи гальванометра линейно связано с величиной  $\Delta R_1$ :

$$\Delta I \approx U \frac{\Delta R_1 R_4}{R_5 (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}.$$

Важнейшая характеристика моста – его чувствительность. Самая высокая чувствительность, когда все  $R_i$  одинаковые. Погрешности мостовых схем, как правило, на порядок, а то и на два меньше, чем погрешности методов прямого преобразования за счет использования высокочувствительного индикатора баланса моста и высоковольтного источника опорного напряжения  $U_0$ . На точность мостовых схем влияет точность меры (известные сопротивления).

Мостовую схему из четырех резисторов в 1833 г. придумал Кристи (S.H. Christie). Однако называют эту конструкцию по имени сэра Чарльза Уитстона (Wheatstone), который в 1843 г. первым воспользовался ею для измерения сопротивления. Помимо определения электрических импедансов мостовой метод может быть также полезен при измерении других величин, таких как тепловые, гидравлические, акустические и т. д.

### ***Контрольные вопросы***

1. Назовите активные и пассивные объекты радиоизмерений.
2. Чем различаются схемы измерения активного и пассивного объектов?
3. Чем различаются схемы активного и пассивного РИП?
4. Назовите источники погрешностей.
5. Как снизить обратное влияние СИ на измеряемый объект?
6. Какие виды и особенности согласования вам известны?
7. Что такое статическая характеристика прибора?
8. Назовите виды и особенности статических характеристик РИП.
9. Как может быть записана и представлена на графике абсолютная погрешность, если она только аддитивная, только мультипликативная или является их суммой?
10. Как может быть записана и представлена на графике относительная погрешность, если она только аддитивная, только мультипликативная или является их суммой?
11. Какие схемы соединения звеньев РИП (модулей) вы знаете и где в каждой из них размещена мера?
12. Как работают мостовые схемы и какие они бывают?
13. Где и почему применяют мостовые методы измерения?
14. Как выглядит формула относительной погрешности СИ, если значения аддитивной и суммарной составляющих абсолютной погрешности выразить в долях конечного значения диапазона измерений  $x_k$ ?

*Задача.* Максимальная приведенная погрешность вольтметра —  $0,01N\%$ . Выберите класс точности и запишите двучленной формулой выражение для относительной погрешности результата измерения так, чтобы аддитивная составляющая была в два раза больше мультипликативной в точке  $X_k=100$  В. Выберите  $a$  и  $b$ .

## Лекция 11. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ (ЦИП)

ЦИП классифицируются по областям и виду измерений, степени автоматизации, наличию интерфейса и микропроцессорной системы (МПС). Цифровыми называют приборы, показания которых представлены в цифровой форме. Они обладают высокой точностью, помехозащищенностью, сопрягаются с внешними системами и ЭВМ через стандартные шины. Все приборы (в том числе и ЦИП), как было показано ранее, можно разделить на две группы: активные (измерители устройств) (рис. 11.1) и пассивные (измерители сигналов) (рис. 11.2).

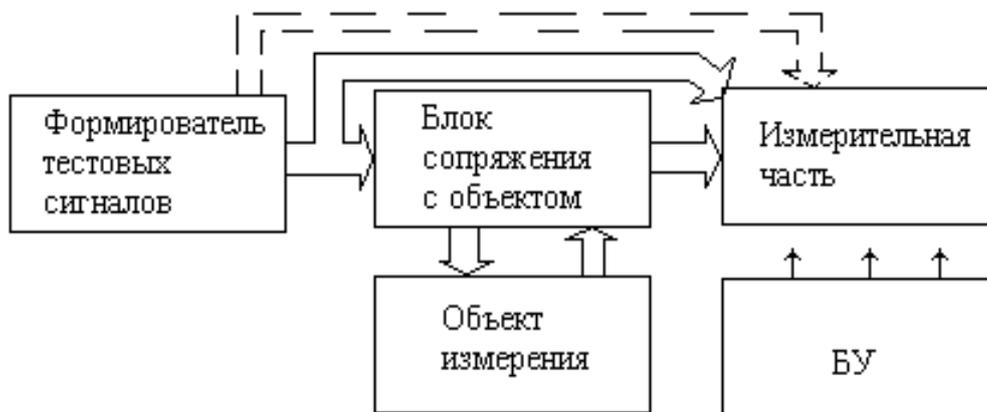


Рис. 11.1

На входы объекта через блок сопряжения поступают испытательные сигналы  $X_{NBX}$ , которые на выходе объекта через блок сопряжения приходят на измерительную часть  $X_{NBVX}$ . По соотношению входных и выходных сигналов можно определить параметры объекта:  $Y = f(X_{NBX}, X_{NBVX})$ . Процедура облегчается, если ввести информацию о параметрах или собственно сигналы  $X_{NBX}$  в измерительную часть. Системой (прибором) управляет блок управления (БУ). *Пример:* измеритель коэффициента передачи  $|K(j\omega)| = U_{BВЫХ} / U_{BВХ}$ .

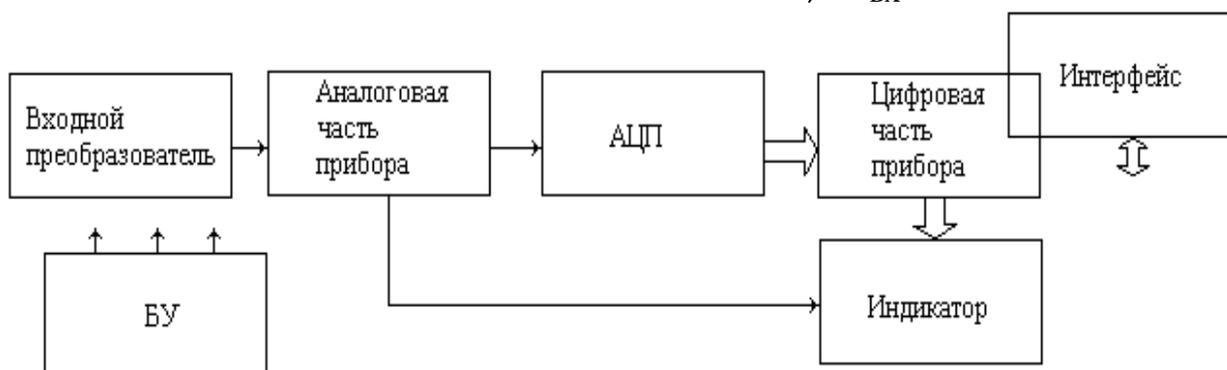


Рис. 11.2

ИП «Сигнал» – это фактически измерительная часть ИП «Устройства». На схеме не показан активный объект измерения, есть только его сигнал, у которого надо измерить параметры. При этом ИП должен содержать совокупность модулей.

Аналоговая часть прибора — это усилители, аттенюаторы, преобразователи частоты, трансформаторы и т. д. Индикатор может быть соединен и с аналоговой частью. Есть также БУ, который всем управляет. Цифровая часть прибора содержит модуль интерфейса, позволяющий формировать результаты измерения и передавать их на внешние устройства, а также применять системы для внешнего управления прибором.

Варианты ЦИП: с жесткой логикой и программируемые (наличие МПС). Если прибор микропроцессорный, то БУ объединяется с цифровой частью и появляются дополнительные возможности.

### **1. Использование микропроцессоров в РИП**

Применение микропроцессоров (МП) – это революция в технологии измерений: не только улучшаются метрологические характеристики, но изменяется идеология построения РИП и систем. Появился новый класс «интеллектуальных» приборов, которые руководят действиями оператора, указывают ему на ошибки и исправляют их. Обобщенная структурная схема РИП и МПС в режиме измерения сигнала (при измерении устройства добавляется стимулирующая часть и блок сопряжения с объектом) представлена на рис. 11.3.

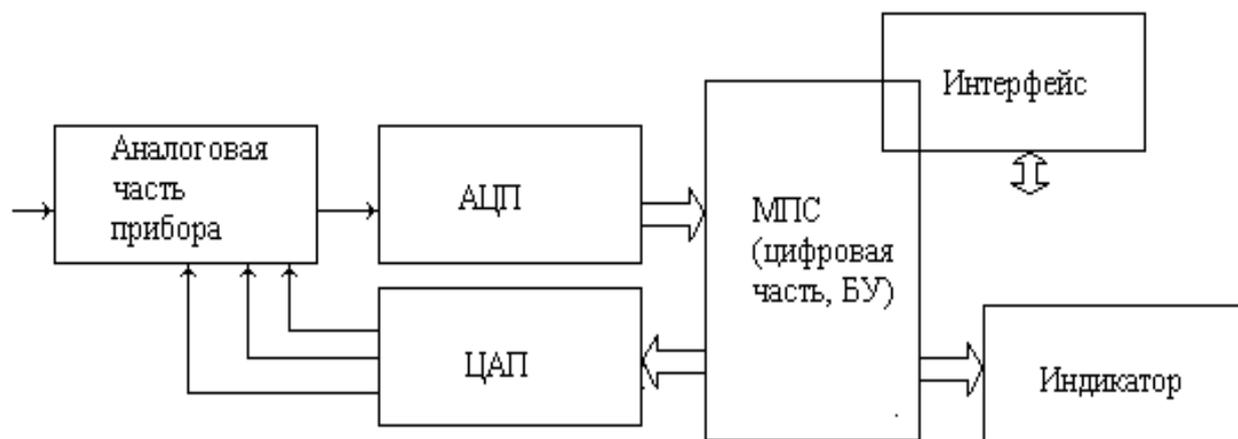


Рис. 11.3

Через ЦАП МПС управляет работой отдельных узлов РИП (в основном аналоговой частью), корректируя полярность, входной сигнал, разрядность и т.д.

## Функции МПС в РИП

### *1. Расширение функциональных возможностей приборов*

До применения МПС многофункциональный прибор – это конструктивное объединение разных функциональных частей, при котором переход от одного режима (параметра) измерения к другому достигается коммутацией узлов и сменой жестких алгоритмов обработки. Применение МПС преобразует работу с жесткой логикой в программно-управляемую работу. При этом функции наращиваются программными средствами при тех же алгоритмах снятия данных (например, измерив  $f$ , можно рассчитать  $T$ ).

### *2. Расширение измерительных возможностей*

Достигается за счет использования принципов косвенных и совокупных измерений, которые в приборах с жесткой логикой обычно не используются. МПС обрабатывает результаты прямых измерений и получает необходимые данные.

### *3. Обработка результатов однократных измерений:*

- масштабирование  $A_{\text{показаний}} = A_{\text{измеренное}} C$ , где  $C - \text{const}$ ;
- смещение  $A_{\text{П}} = A_{\text{П}} - b$ , где  $b - \text{const}$ ;
- нормирование  $A_{\text{П}} = A_1 / A_2$ ;
- логарифмирование  $K = 20 \cdot \log(A_1 / A_2)$  и др.

### *4. Обработка многократных измерений*

При этом возможно представление статистических характеристик: математического ожидания, среднеквадратического отклонения и др.

### *5. Облегчение управления приборами*

Чем выше уровень программного обеспечения, тем менее сложная передняя панель прибора. «Интеллектуальный» прибор укажет ошибочные действия оператора, подскажет правильный путь. В простейшем случае это автоматические процедуры выбора предела измерений (АВП), полярности и времени усреднения, установки нуля, калибровки.

### *6. Миниатюризация и экономичность аппаратуры*

Достигается за счет уменьшения узлов и соединения ряда функций путем обработки в МПС.

### *7. Повышение надежности прибора*

Достигается за счет уменьшения аналоговой (как правило, более ненадежной) части прибора.

### 8. Сокращение продолжительности разработки РИП

Достигается за счет программного расширения функций уже существующих приборов. С учетом имеющихся программ (библиотек) разработчику достаточно выбрать и адаптировать программу к реальной задаче.

### 9. Организация измерительных систем

Прибор с МПС обычно имеет интерфейс (например КОП), позволяющий подключить его к стандартной интерфейсной шине. Можно объединить совокупность приборов и ЭВМ в единый комплекс или систему.

### 10. Повышение точности измерений

Достигается за счет пп. 2, 3, 4 и 5. Обеспечивается устранение промахов, исключаются или рандомизируются систематические погрешности, уменьшается влияние случайной погрешности и шумов.

#### Исключение системной погрешности:

- коррекция смещения АХ прибора;
- калибровка коэффициента передач в точке и полосе (АЧХ);
- линеаризация характеристик детекторов;
- компенсация влияния коэффициентов отражения и т.д.

Рассмотрим схему коррекции «0», калибровки коэффициента передачи в аналоговом тракте ЦИП и компенсации нелинейности АХ (рис. 11.4).

В процессе работы прибора его вход периодически «заземляется» и проверяется нуль. При его отсутствии через ЦАП осуществляется установка нуля, или смещение нуля, что запоминается в МПС, а результат перед подачей на индикатор корректируется:  
 $y = y_n (\pm) \Delta "0"$ .

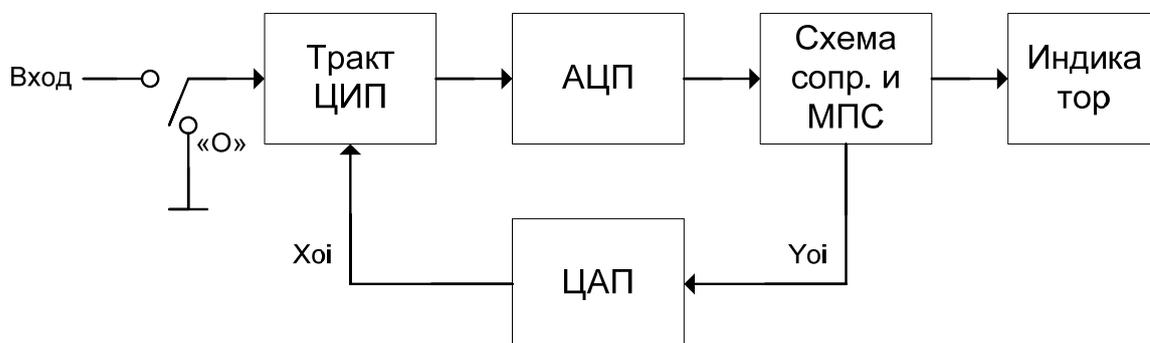


Рис. 11.4

Для коррекции коэффициента передачи в памяти МПС хранится набор значений  $y_{oi}$ , которые должны быть при  $x_{oi}$ . Периодически МПС вырабатывает значение  $y_{oi}$ , наиболее близкое к измеряемому значению. При этом на входе тракта измерения ЦАП формирует эталонный сигнал  $x_{oi}$ . В результате работы тракта и АЦП получится результат  $y_{ni} \neq y_{oi}$ . Вычисляется поправочный коэффициент  $\alpha_i = y_{oi} / y_{ni}$ , который хранится в памяти МПС. При входном сигнале  $x \rightarrow x_{oi}$  результат  $y_{io} = y_{ni} \alpha_i$ .

Для коррекции АХ запоминают значения  $\alpha_i$  для разных уровней сигналов, для коррекции АЧХ значения  $\alpha_{fi}$  принимают с учетом рабочей частоты.

#### Уменьшение влияния случайной погрешности

Накопление и обработку результатов многократных испытаний (измерений) осуществляет МПС. Могут быть разные алгоритмы с оценкой достоверности, доверительного интервала; с накоплением данных для получения результата с заданной точностью. Вариант алгоритма приведен на рис. 11.5.

#### Компенсация внутренних шумов

Позволяет повысить чувствительность прибора, расширить его динамический диапазон. Вариант обработки может быть следующим. До подачи сигнала измеряется средний квадрат шумового сигнала и запоминается  $U_{ш.ср}^2$ , при подаче сигнала считается, что шум тот же. Сумма возводится в квадрат и усредняется:

$$U_{с.ср}^2(t) + 2U_c(t)U_{ш}(t) + U_{ш.ср}^2(t) = U_{с.ср}^2(t) + U_{ш.ср}^2(t).$$

Здесь среднее значение произведения равно нулю, так как сигнал и шум независимы (некоррелированы). Из полученной суммы вычитают найденный шум, извлекают квадратный корень и получают значение сигнала.

### **Условия применения МП**

При выборе между жесткой логикой и МП считается, что МП лучше, если:

- число интегральных схем для жесткой логики  $\geq 30$ ;
- нужен программируемый, многофункциональный прибор;
- предполагается наращивание функций;

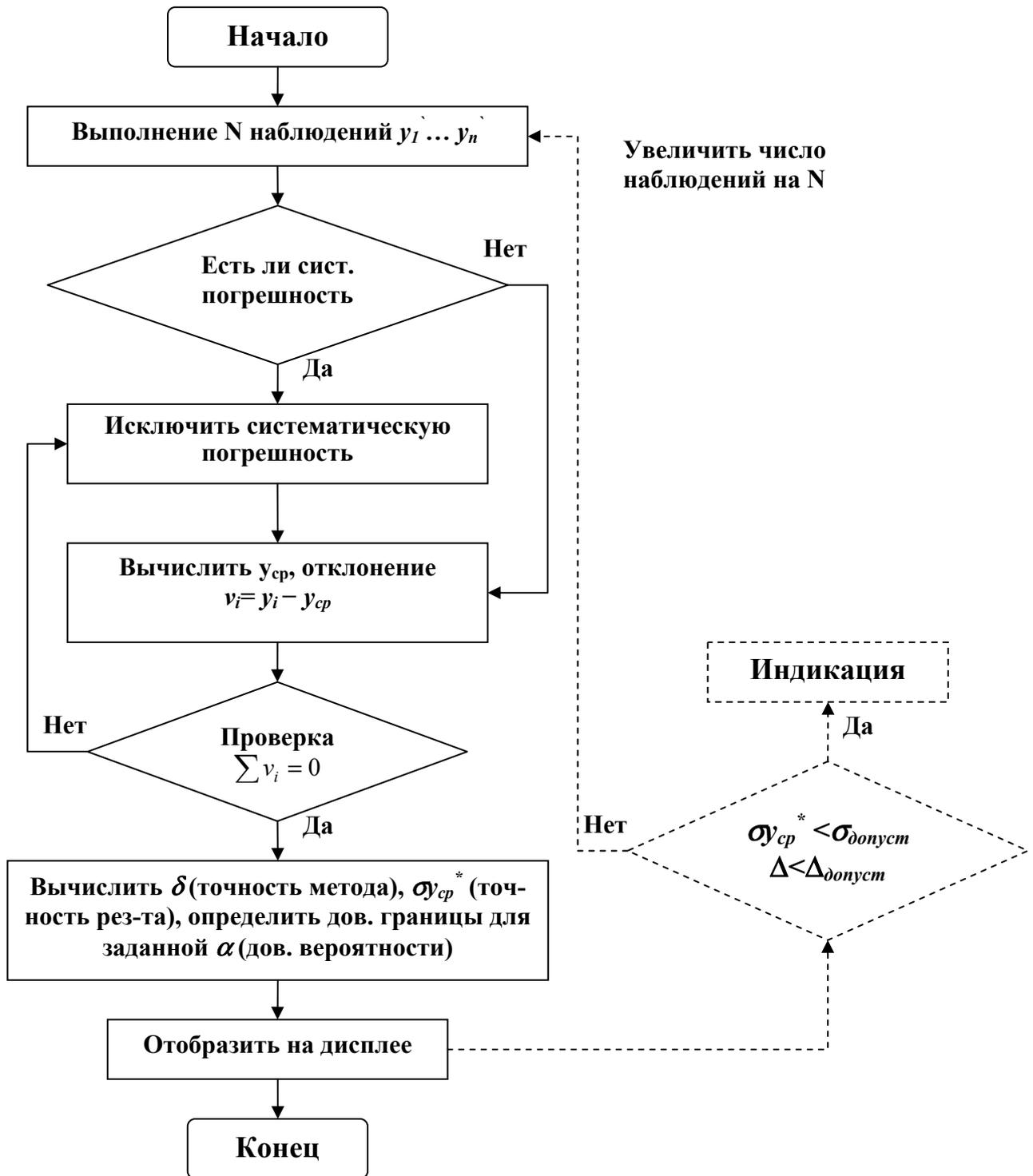


Рис. 11.5

- требуется запоминать или обрабатывать данные;
- реализуются алгоритмы косвенных или совокупных измерений;
- велик объем измерений;
- следует автоматизировать управление прибором;
- необходимо получать сведения о погрешностях.

### **Условия ограничения применения МП**

1. Трудности выбора базового МП из-за недостаточных профессиональных знаний, нехватки технических материалов по конкретным МП, слабой базы разработчика (нужны логические и сигнатурные анализаторы, программаторы).

2. Ограниченное быстродействие МП.

3. Сложности программного обеспечения – основное ограничение. Следует искать готовые пакеты программ.

4. Специфика испытаний, контроля, диагностики и поверки средств измерения с МП. Так как здесь велика роль программных средств, «обычная» метрология не всегда применима. Наиболее часто МП осуществляет самотестирование приборов, для этого разрабатываются внутренние диагностические программы. Применяют логический анализ (анализаторы логических состояний); сигнатурный анализ (сигнатура – четырехзначное шестнадцатиричное число, на дисплей выводится идеальная и реальная сигнатуры); принципы самотестирования.

### ***2. Принципы кодирования и аналого-цифрового преобразования***

АЦП представляет аналоговый измерительный сигнал в виде кода. Кодирование производится по определенному правилу. В десятичной форме исчисления любое целое число может быть представлено в виде

$$N = \sum_{i=1}^n k_i \cdot 10^{i-1},$$

где  $n$  – число разрядов,  $k_i = 0, 1, 2, \dots, 9$ .

*Пример:*  $902 = 8 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0$ .

В двоичной системе  $N = \sum_{i=1}^n k_i \cdot 2^{i-1}$ , где  $k_i = 0, 1$ . Тогда

$$902 = 1 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$$

или

$$902 = 512 + 256 + 128 + 0 + 0 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0.$$

Наиболее распространена двоично-десятичная система кодирования, когда каждый десятичный разряд представляют в двоичном коде 8-4-2-1. Тогда

$$902 = (1+8) \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0.$$

Коды этого числа следующие:

1001	0000	0010
9	0	2

Применяют также коды, в которых каждый десятичный разряд представлен некоторой комбинацией целых положительных чисел:

$2 - 4 - 2 - 1$	$5 - 2 - 1 - 1$
$a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4$	$a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4$

Любое число от 0 до 9 представляется линейной комбинацией:

$$S = k_1 a_1 + k_2 a_2 + k_3 a_3 + k_4 a_4, \text{ где } k_i = 0, 1.$$

Вид кодирования влияет на достоверность информации в условиях действия помех на преобразователь.

*Коды Фибоначчи* основаны на кодовой избыточности и обладают высокой устойчивостью к сбоям. Обобщенными числами Фибоначчи, или  $p$ -числами названы числа, полученные с помощью соотношения:

$$\varphi_p(n) = \varphi_p(n-1) + \varphi_p(n-p-1),$$

где  $p = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\varphi_p(0) = \varphi_p(1) = \dots = \varphi_p(p) = 1$  – начальные условия.

Для  $p=0$   $\varphi_0(n) = \varphi_0(n-1) + \varphi_0(n-1)$ , т.е. каждое последующее число равно удвоенному предыдущему. Начальные условия:  $\varphi_0(0) = 1$ ;  $\varphi_0(1) = \varphi_0(0) + \varphi_0(0) = 2$ ;  $\varphi_0(2) = 4$ ;  $\varphi_0(3) = 8$ ;  $\varphi_0(4) = 16$ , т.е. получили двоичный ряд: 1, 2, 4, 8, 16... .

Для  $p = \infty$  получаем единичный (унитарный) код: 1, 1, 1 ... 1... .

Для  $1 \leq p < \infty$  при  $n \rightarrow \infty$  имеем последовательность, в которой отношение двух следующих чисел приближается к «золотой пропорции»  $\left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)$ .

При  $p = 1$  очередное число  $\varphi_1(n) = \varphi_1(n-1) + \varphi_1(n-2)$ , т.е. равно сумме двух предыдущих: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 ... .

Любое натуральное число может быть представлено в виде  $p$ -кода.

В двоичном коде каждому числу соответствует только одно двоичное слово, а в коде Фибоначчи – несколько.

Рассмотрим пример представления пятиразрядных чисел для  $p=1$  (таблица).

Число	Веса разрядов					Число	Веса разрядов					Число	Веса разрядов				
	5	3	2	1	1		5	3	2	1	1		5	3	2	1	1
0	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	8	1	1	0	0	0
1	0	0	0	0	1	5	0	1	1	0	0	8	1	0	1	1	0
1	0	0	0	1	0	5	0	1	0	1	1	8	1	0	1	0	1
2	0	0	1	0	0	6	1	0	0	1	0	9	1	1	0	1	0
2	0	0	0	1	1	6	1	0	0	0	1	9	1	1	0	0	1
3	0	1	0	0	0	6	0	1	1	1	0	9	1	0	1	1	1
3	0	0	1	1	0	6	0	1	1	0	1	10	1	1	1	0	0
3	0	0	1	0	1	7	1	0	1	0	0	10	1	1	0	1	1
4	0	1	0	1	0	7	1	0	0	1	1	11	1	1	1	0	1
4	0	1	0	0	1	7	0	1	1	1	1	11	1	1	1	1	0
4	0	0	1	1	1	–	–	–	–	–	–	12	1	1	1	1	1

Важная особенность кода – множественность представления чисел (в примере кроме 0 и 12). Наибольший интерес имеют представления чисел по минимальной форме (наименьшее число единиц).

Избыточность придает АЦП новые качества. Представление числа в  $p$ -коде корректно, когда между соседними единицами не меньше чем  $p$  нулей. К корректным относятся также комбинации, когда между соседними единицами нет нуля, но есть нуль справа. Проверка корректности кодовых комбинаций позволяет повышать помехоустойчивость, надежность и контролировать работоспособность АЦП. Когда происходит сбой, то появляются некорректные комбинации, которые анализируются и исключаются из рассмотрения. Для поразрядного кодирования могут быть дополнительные ограничения по срабатыванию ячеек сверху вниз (от старшей к младшей), т.е. каждому числу должен соответствовать один код.

### ***Контрольные вопросы***

1. Чем отличаются цифровые приборы от аналоговых, активные (измерители устройств) от пассивных (измерители сигналов)?
2. Что содержит аналоговая и цифровая части прибора?

3. Какой прибор можно назвать «интеллектуальным»?
4. Зачем нужен ЦАП в РИП?
5. Перечислите основные функции МПС в РИП.
6. Приведите примеры обработки данных в ЦИП.
7. Поясните методику коррекции «0», калибровки коэффициента передачи и компенсации нелинейности АХ.
8. Поясните методику уменьшения влияния случайной погрешности.
9. Когда при выборе между жесткой логикой и МП предпочтение отдается МПС?
10. Что ограничивает применение МПС?
11. В каких кодах АЦП представляет аналоговый измерительный сигнал?
12. Каковы преимущества кодов Фибоначчи?
13. Представьте число  $1000 - 7N$  в десятичной форме.
14. Представьте число  $1000 - 7N$  в двоичной форме.
15. Представьте число  $1000 - 7N$  в двоично-десятичной форме.
16. Представьте число  $1000 - 7N$  в виде кода Фибоначчи.

## Лекция 12. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ

### *1. Аналого-цифровые преобразователи*

Входные аналоговые сигналы АЦП преобразуют в цифровую форму, пригодную для обработки микропроцессорами и другими цифровыми устройствами. Процедура аналого-цифрового преобразования непрерывных сигналов представляет собой преобразование непрерывной функции времени  $U(t)$ , описывающей исходный сигнал, в последовательность чисел  $\{U'(t_j)\}$ ,  $j=0,1,2,\dots$ , отнесенных к некоторым фиксированным моментам времени. Эту процедуру можно разделить на две операции. Первая из них называется дискретизацией и состоит в преобразовании непрерывной функции времени  $U(t)$  в непрерывную последовательность  $\{U(t_j)\}$ . Вторая операция называется квантованием и состоит в преобразовании непрерывной последовательности в дискретную  $\{U'(t_j)\}$ .

Наиболее распространенная форма дискретизации – равномерная, в основе которой лежит теорема отсчетов, согласно которой период дискретизации следует выбирать из условия  $\Delta t = 1/2F_m$ , где  $F_m$  – максимальная частота спектра преобразуемого сигнала.

## Способы аналого-цифрового преобразования

### 1. Методы последовательного счета

Методы последовательного счета осуществляют последовательное сравнение измеряемой величины с известной квантованной мерой (рис. 12.1). Например, неизвестная  $X = \text{const}$  сравнивается с величиной меры, изменяющейся ступенчатым образом.

В качестве меры можно использовать ЦАП. По сигналу «Пуск» счетчик сбрасывается в «0» и начинается счет импульсов  $f_{\text{сч}}$ . При этом линейно-ступенчато возрастает выходное напряжение ЦАП. При достижении  $U_{\text{ЦАП}} \rightarrow U_{\text{ВХ}}$  прекращается подсчет импульсов и код счетчика перемещается в регистр памяти.

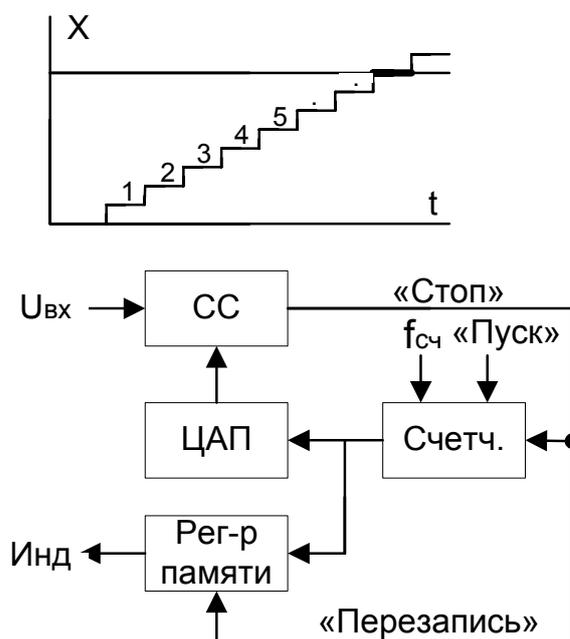


Рис. 12.1

Нелинейность ЦАП может составлять единицы процентов, что ограничивает применение метода.

Время преобразования АЦП этого типа переменное и определяется входным напряжением. Его максимальное значение соответствует максимальному входному напряжению. При разрядности двоичного счетчика  $N$  и частоте тактовых импульсов  $F_{\text{ТАКТ}}$

$$T_{\text{ПР.МАКС}} = (2^N - 1) / F_{\text{ТАКТ}}$$

Например, при  $N=10$  и  $F_{\text{ТАКТ}}=1$  МГц  $T_{\text{ПР.МАКС}}=1024$  мкс, что обеспечивает максимальную частоту выборок порядка 1 кГц. Статическая погрешность преобразования определяется суммарной статической погрешностью используемых ЦАП и компаратора.

Особенность АЦП последовательного счета – небольшая частота дискретизации. Достоинство – сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования. Известны и другие схемы АЦП последовательного счета: времяимпульсные, двойного интегрирования (АЦП на ИС К572ПВ2 имеет погрешность приблизительно 0,05 %).

## *2. Метод последовательного приближения*

Преобразователь этого типа, называемый в специальной литературе также АЦП с поразрядным уравниванием, – наиболее распространенный вариант последовательных АЦП. В методе последовательного приближения происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины  $X$  с квантованной  $X_k$ , изменяющейся по определенному закону. Меру можно регулировать скачками от возможного максимального значения:  $1, 1/2, 1/4, 1/8$  и т.д., суммируя с предыдущей величиной. Это позволяет для  $N$ -разрядного АЦП последовательного приближения выполнить весь процесс преобразования за  $N$  последовательных шагов (итераций) вместо  $2^N - 1$  при использовании последовательного счета и получить существенный выигрыш в быстродействии. Так, при  $N=10$  этот выигрыш достигает 100 раз, что позволяет получить с помощью таких АЦП  $10^5 \dots 10^7$  преобразований в секунду. В то же время статическая погрешность этого типа преобразователей, определяемая используемым ЦАП, может быть очень малой, что позволяет реализовать разрешающую способность до 18 двоичных разрядов при частоте выборок 200 кГц (например DSP101 фирмы Burr-Brown) и более.

В режиме поразрядного кодирования работает АЦП на ИС К1108ПВ1 и К1113ПВ1.

Быстродействие АЦП определяется суммой времени установления  $T_{уст}$  ЦАП, времени переключения компаратора  $T_k$  и задержки распространения сигнала в регистре последовательного приближения  $T_3$ . Данный класс АЦП занимает промежуточное положение по быстродействию, стоимости и разрешающей способности между последовательно-параллельными и интегрирующими АЦП.

## *3. Метод считывания (параллельные АЦП)*

АЦП этого типа осуществляют квантование сигнала одновременно с помощью набора компараторов, включенных параллельно источнику входного сигнала (рис. 12.2). В АЦП происходит одновременное сравнение измеряемой величины  $X$  со всеми уровнями квантования  $X_{k1} \dots X_{ki}$ . Наиболее близкий уровень сверху или снизу принимается за результат. Метод называют еще непосредственным кодированием.

Рассмотрим АЦП типа К1107ПВ1. На входе – резистивный делитель с 64 отводами. Далее стоят 64 схемы сравнения, дешифратор 64х6, на выходе которого формируется шестиразрядный двоичный код. Преобразователь позволяет менять тип кода памяти и индикации. Быстродействие при квантовании на 64 уровня 100 нс, но ИС К1107ПВ3 позволяет делать то же за 20 нс, а К1107ПВ2 использует 256 уровней за 100 нс. В настоящее время существует АЦП с быстродействием 1 нс и выше.

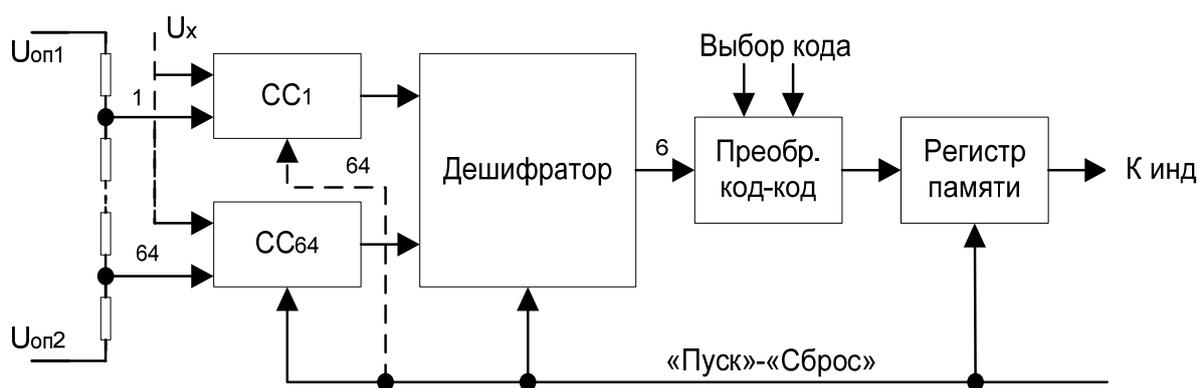


Рис. 12.2

Для повышения помехозащищенности некоторые интегральные микросхемы (ИМС) параллельных АЦП, например МАХ100, снабжаются сверхскоростными устройствами выборки и хранения (УВХ), имеющими время выборки порядка 0,1 нс. Другой путь состоит в использовании кода Грея, характерная особенность которого – изменение только одной кодовой позиции при переходе от одного кодового значения к другому. Наконец, в некоторых АЦП (например МАХ1151) для снижения вероятности сбоев при параллельном преобразовании используется двухтактный цикл, когда сначала состояния выходов компараторов фиксируются, а затем в него записывают выходное слово АЦП.

Благодаря одновременной работе компараторов параллельный АЦП является самым быстрым. Например, восьмиразрядный преобразователь типа МАХ104 позволяет получить 1 млрд отсчетов в секунду при времени задержки прохождения сигнала не более 1,2 нс. Недостаток этой схемы – высокая сложность. Действительно,  $N$ -разрядный параллельный АЦП содержит  $2^N - 1$  компаратора и  $2N$  согласованных резистора. Следствие этого – высокая стоимость и значительная потребляемая мощность.

#### 4. Комбинированные методы

Комбинированные методы позволяют повысить точность, разрешающую способность и быстродействие. Из комбинированных методов нашли применение интегралопотенциметрический (сочетание преобразования  $U \rightarrow f$  и поразрядного кодирования), метод расширенной динамической шкалы (сочетание времяимпульсного и поразрядного кодирования) и др.

*Последовательно-параллельные АЦП* – компромисс между стремлением получить высокое быстродействие и желанием сделать это меньшей ценой. Они занимают промежуточное положение по разрешающей способности и быстродействию между параллельными АЦП и АЦП последовательного приближения. Последовательно-параллельные АЦП подразделяют на многоступенчатые, многотактные и конвейерные.

*В многоступенчатом АЦП* процесс преобразования входного сигнала разделен в пространстве на грубое преобразование сигнала в старшие разряды и точное преобразование в младшие разряды выходного кода. Из-за наличия задержки сигнала в первой ступени возникает временное запаздывание, поэтому при использовании этого способа входное напряжение необходимо поддерживать постоянным с помощью устройства выборки-хранения (УВХ) до тех пор, пока не будет получено все число.

*В многотактных АЦП* процесс преобразования разделен во времени. Преобразователь состоит из  $K$ -разрядного параллельного АЦП,  $K$ -разрядного ЦАП и устройства управления. Устройство управления пересылает полученное от АЦП в первом такте слово в  $K$  старших разряда выходного регистра, подает это слово на вход ЦАП и уменьшает в  $K^2$  раз опорное напряжение АЦП. Таким образом, во втором такте остаток, образовавшийся при вычитании из входного напряжения схемы выходного напряжения ЦАП, будет преобразован в младший полубайт выходного слова. Входное напряжение многотактного АЦП во время преобразования должно быть неизменным.

Преобразователь такого типа оказывается медленнее двухступенчатого преобразователя, рассмотренного выше. Однако он проще и дешевле. По быстродействию многотактные АЦП занимают промежуточное положение между многоступенчатыми АЦП и АЦП последовательного приближения. Примером является трехтактный 12-разрядный преобразователь AD7886 со временем преобразования 1 мкс.

*Конвейерные АЦП* также применяют принцип многоступенчатой обработки входного сигнала. Вначале происходит формирование старших разрядов выходного слова в АЦП1, а затем идет период установления выходного сигнала ЦАП. На этом интервале АЦП2 простаивает. На втором этапе во время преобразования остатка в АЦП2 простаивает АЦП1.

Конвейерная архитектура позволяет существенно (в несколько раз) повысить максимальную частоту выборок. Можно без проигрыша в быстродействии увеличить число ступеней АЦП, понизив разрядность каждой ступени. В свою очередь, увеличение числа ступеней преобразования уменьшает сложность АЦП. Например, для построения 12-разрядного АЦП из четырех 3-разрядных необходимо 28 компараторов, тогда как его реализация из двух 6-разрядных потребует 126 компараторов. Конвейерную архитектуру имеет большое количество АЦП, в частности AD9040A, выполняющий до 40 млн преобразований в секунду.

## **2. Параметры АЦП**

При оценке метрологических характеристик АЦП используют параметры: число разрядов АЦП, время установления, время преобразования, нелинейность, дифференциальная нелинейность, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), фазочастотная характеристика (ФЧХ).

Так как наряду с АЦП часто используют другие устройства, такие как мультиплексоры, усилители, фильтры, УВХ, их искажения будут суммироваться с погрешностью АЦП и определять метрологические характеристики адаптера, в состав которого входит АЦП.

Статические параметры АЦП представлены на рис. 12.3.

*Идеальная характеристика преобразования* (1) (см. рис. 12.3) – прямая линия, «наиболее приближенная» к точкам характеристики преобразования.

*Характеристика преобразования ХП* (2) (см. рис. 12.3) – зависимость выходного кода АЦП от входного напряжения  $U_{ВХ}$ .

*Число разрядов АЦП  $N$*  – двоичный логарифм максимального числа кодовых комбинаций на выходе АЦП. Если число разрядов  $N$ ,

тогда число  $2^N$  даст количество комбинаций в выходном коде преобразователя, при этом их диапазон будет равен  $0 \dots (2^N - 1)$ . Для 12-разрядного АЦП количество комбинаций составит  $2^{12} = 4096$  в диапазоне от 0 до 4095.

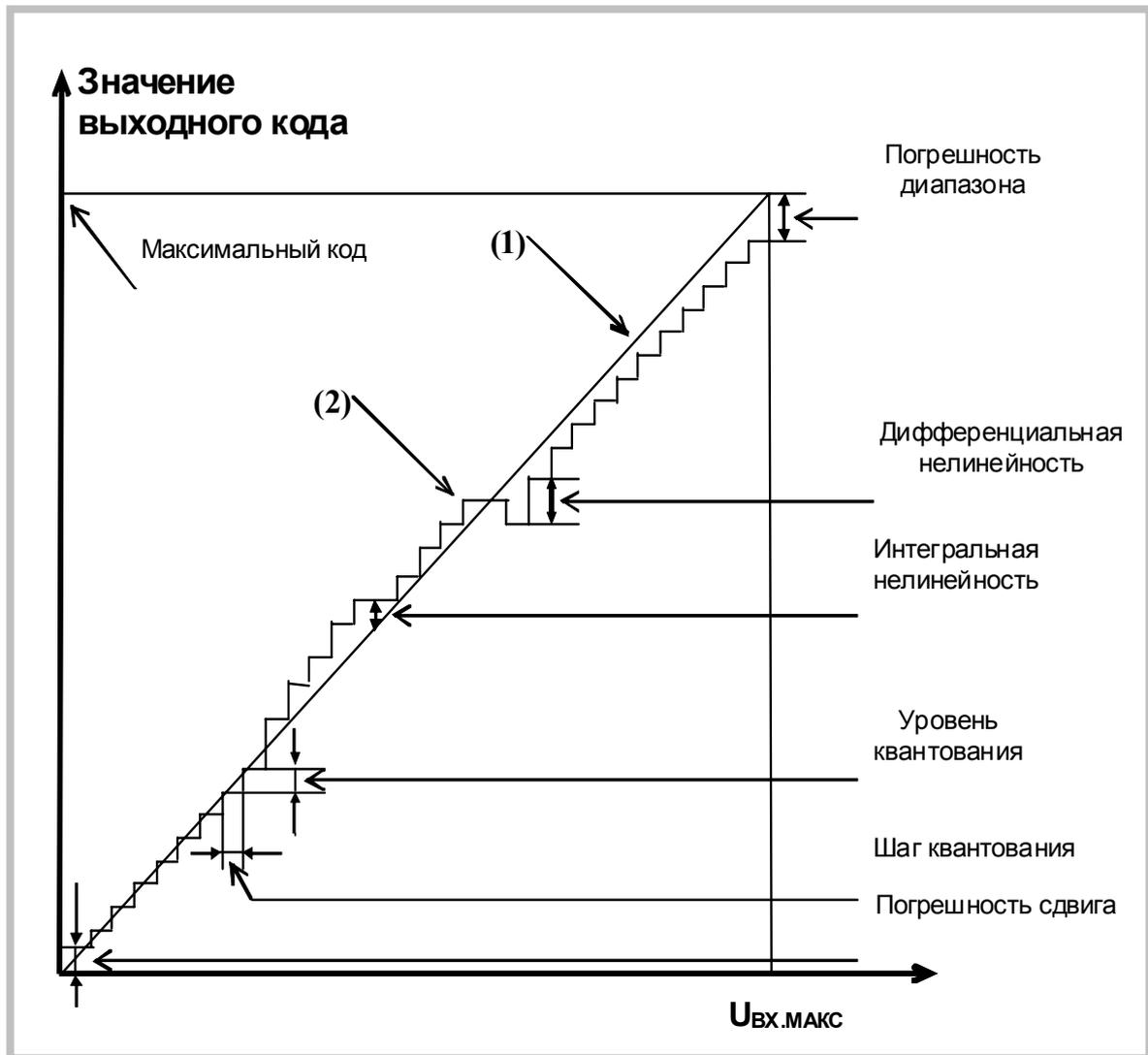


Рис. 12.3

*Максимальная частота дискретизации (преобразования)* — это наибольшая частота, с которой происходит образование выборочных значений сигнала и при которой выбранный параметр АЦП не выходит за заданные пределы. Измеряется числом выборок в секунду.

*Время преобразования  $t_{ПРБ}$*  — интервал времени от начала преобразования АЦП до появления на выходе устойчивого кода.

*Время выборки (стробирования)* — время, в течение которого происходит образование одного выборочного значения.

*Погрешность сдвига* – смещение характеристики преобразования в точке начала координат графика.

*Погрешность диапазона*  $\delta_{\text{пд}}$  – погрешность преобразователя в конечной точке диапазона (отклонение в конечной точке).

*Пороговый уровень* – величина входного аналогового уровня АЦП, при котором выходной код меняется на единицу.

*Нелинейность* – отклонение по вертикальной оси точек реальной характеристики от идеальной характеристики преобразования, разделяющих пополам расстояние (по оси абсцисс) между средними значениями пороговых уровней.

*Дифференциальная нелинейность*  $\delta_{\text{диф}}$  – отклонение разности двух аналоговых сигналов, соответствующих последовательной смене кодов. При монотонном увеличении сигнала на выходе АЦП может возникать код, который соответствует одному и тому же входному сигналу, в то время как сам входной сигнал изменился более одного шага квантования, который равен  $U_{\text{ВХ.МАКС}}/2^N$ .

*Число эффективных разрядов (ЧЭР)  $N_{\text{эфф}}$*  – комплексный динамический параметр. ЧЭР учитывает любые виды погрешностей. Ошибки преобразователя обусловлены дифференциальной и интегральной нелинейностями, апертурной неопределенностью и пропуском кодов. ЧЭР вычисляется по формуле  $N_{\text{эфф}}=(C/[\text{Ш}+\text{И}]-1,76)/6,02$ , где  $C/[\text{Ш}+\text{И}]$  оценивается по результату вычисления преобразования Фурье измеренного калибровочного гармонического сигнала.

### **Шумы АЦП**

В идеале повторяющиеся преобразования фиксированного постоянного входного сигнала должны давать один и тот же выходной код. Однако вследствие неизбежного шума в схемах АЦП существует некоторый диапазон выходных кодов для заданного входного напряжения. Если подать на вход АЦП постоянный сигнал и записать большое число преобразований, то в результате получится некоторое распределение кодов. Если подогнать гауссовское распределение к полученной гистограмме, то стандартное отклонение будет примерно эквивалентно среднеквадратическому значению входного шума АЦП.

Методы и средства поверки АЦП:

- по образцовому, более точному АЦП;
- по образцовому ЦАП (с двойным преобразованием  $U \rightarrow N_u \rightarrow U$ );
- по образцовому гармоническому сигналу с определением спектра нелинейных искажений.

### 3. Преобразователи код – аналог (ПКА) Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)

ПКА (или ЦАП) – программно-управляемая мера величины. Часто ЦАП устанавливают в обратной ветви АЦП для преобразования выходного кода в аналоговую компенсирующую величину. Уравнение преобразования ЦАП может быть записано как  $X_N = \beta N$ , где  $N$  – код,  $\beta$  – коэффициент преобразования.

ПКА различают по роду выходной аналоговой величины, в качестве которой может быть напряжение ( $U$ ), ток ( $I$ ), угол поворота ( $\lambda$ ), сопротивление ( $R$ ), проводимость ( $G$ ), интервал времени ( $T$ ), фаза ( $\varphi$ ), частота ( $f$ ).

Наиболее распространены ЦАП, в которых выходным сигналом является напряжение. Есть много других специальных ПКА.

#### 1. Преобразователи кода $N$ в угол ( $N \rightarrow \alpha$ )

Преобразователями числоимпульсного кода в  $\alpha$  являются шаговые двигатели, система управления которыми изображена на рис. 12.4. Каждый импульс соответствует угловому шагу  $q_n$ . Если код  $\alpha$  дается в виде 8 – 4 – 2 – 1, тогда необходима схема с генератором тактовых импульсов.

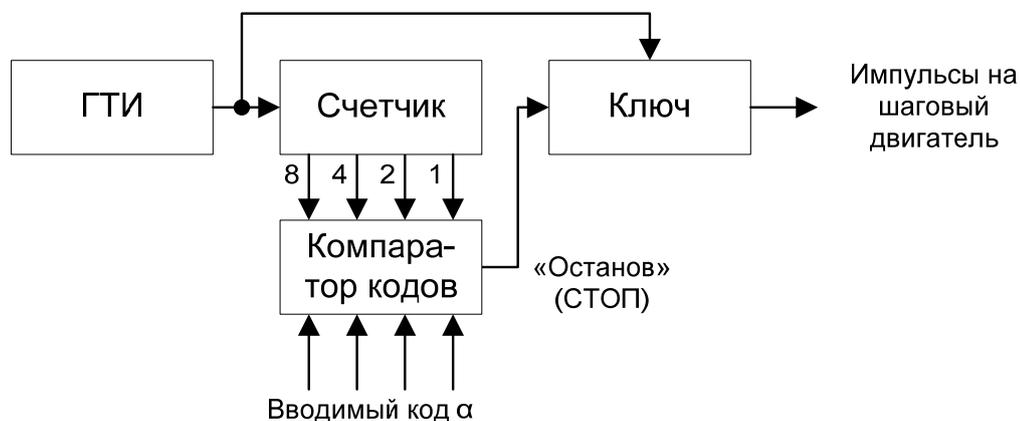


Рис. 12.4

#### 2. Преобразователь $N \rightarrow T_N (F_N)$ , ДПКД (рис. 12.5, 12.6)

Счетчик может быть реверсивным (+, –).

Представленная схема (см. рис. 12.5) – один из вариантов так называемой схемы ДПКД (делитель с переменным коэффициентом деления), широко используемой в РПДУ в качестве возбудителей, в синтезаторах частот (измерительных), в ЭСЧ СВЧ. Здесь ДПКД увеличивает время счета.

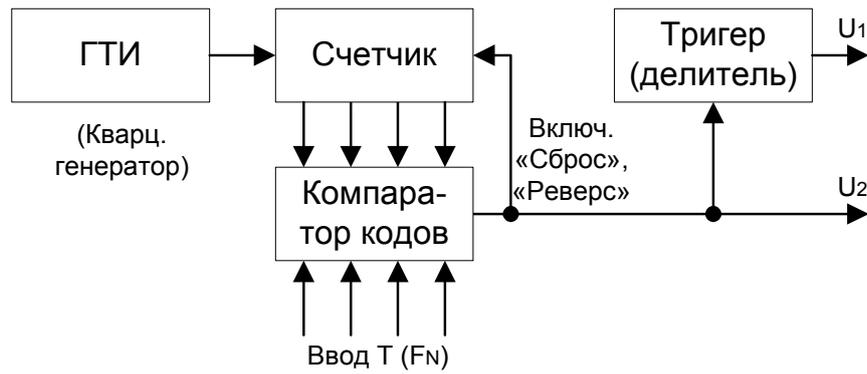


Рис. 12.5

### 3. Преобразователь $N \rightarrow \Phi_N$

Работает по принципу программируемой задержки (рис. 12.7). В счетчик 2 вводится начальный код, соответствующий требуемой задержке. На выходах счетчиков могут включаться фильтры для выделения 1-й гармоники. По этому принципу работает мера фазового сдвига  $\Phi 1-4$  с погрешностью  $0,1 \dots 0,03^\circ$ .

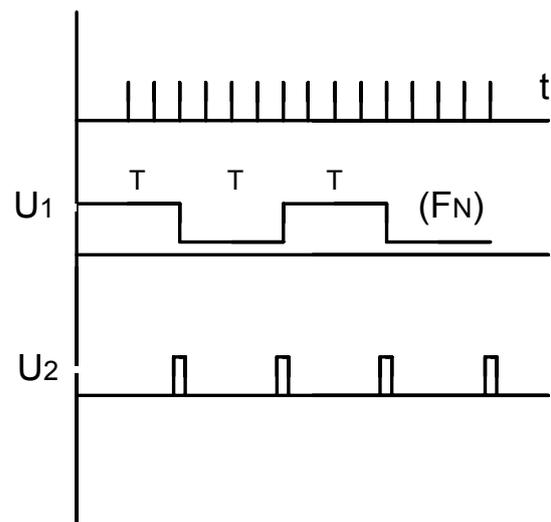


Рис. 12.6

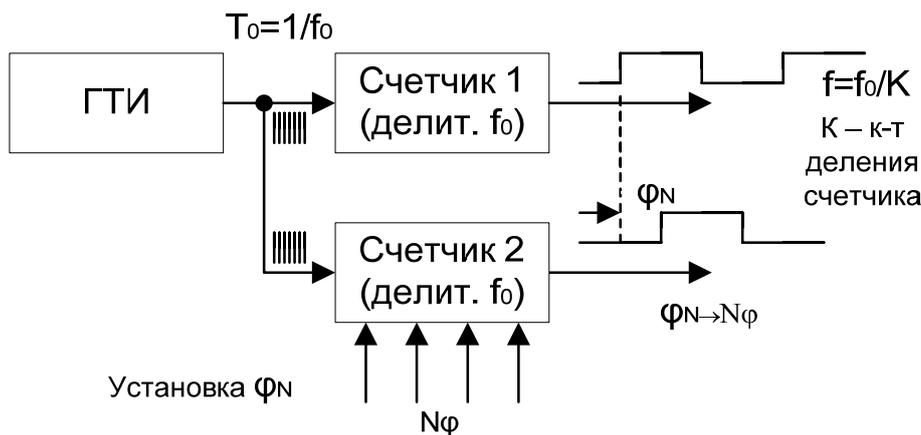


Рис. 12.7

### 4. Преобразователь $N \rightarrow R_N$ (последовательная схема) (рис. 12.8)

Аналогичная схема параллельного типа преобразует цифровой код в проводимость  $G_N$ . Параллельная схема считается более быстрой.

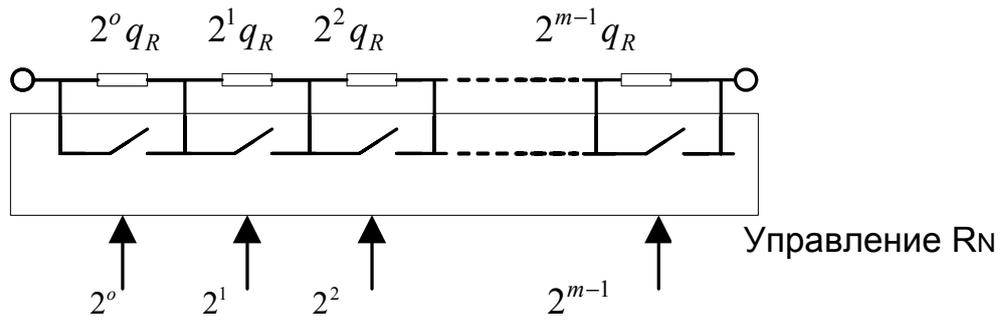


Рис. 12.8

### 5. Преобразователь $N \rightarrow f_N$

Рассмотренный выше преобразователь  $N \rightarrow T_N$  позволяет синтезировать нужные частоты, однако сигнал в виде меандра богат гармониками. Там, где требования к частоте спектра высокие, используют ГУН – генераторы, управляемые напряжением, вырабатывающие чистый гармонический сигнал (рис. 12.9). Счетчик измеряет частоту ГУН и результат подает на устройство сравнения кодов, на другой вход которого подан код требуемой частоты. Разностный код через ЦАП управляет частотой ГУН до равенства.

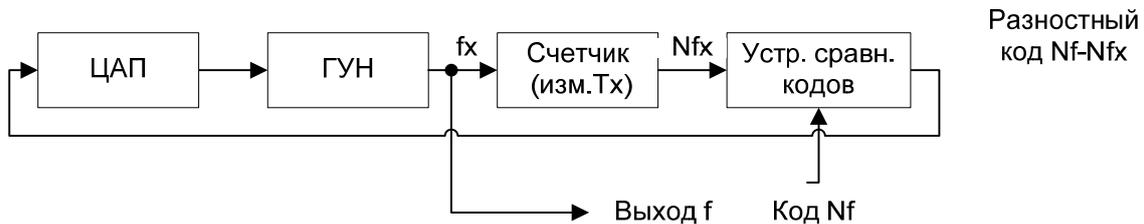


Рис. 12.9

Чаще измеряется  $T_x$  для повышения быстродействия и вводится код  $N_T$ .

### 6. Преобразователь $N \rightarrow U_N$

Наибольшее распространение получили серийно выпускаемые в виде ИС ЦАП с преобразованием код – напряжение  $N \rightarrow U_N$  на базе одинаковых или близких по размеру резисторов. Требования:

- высокая точность, быстродействие и линейность;
- $R_{\text{вых}}$  малое (const);
- $R_{\text{вх}}$  большое (const).

Приведем один из вариантов схемы ЦАП, в которой применено многозвенное сопротивление в виде ячеек  $R - 2R$  (рис. 12.10). Здесь  $U_o$  – мера (образцовое напряжение).

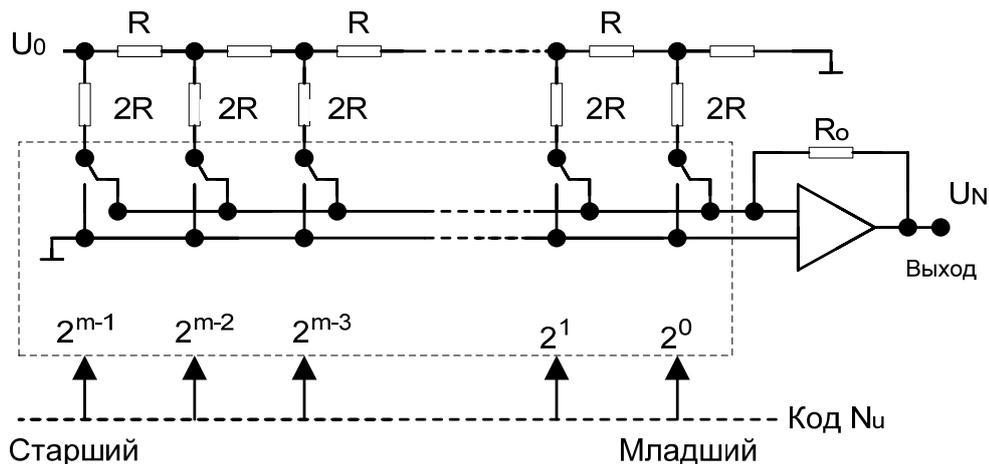


Рис. 12.10

Выпускают ИС ЦАП: К572ПА1 (10 разрядов) – 5 мкс, К572ПА2 (12 разрядов) – 15 мкс, К594ПА1 (12 разрядов) – 3,5 мкс, К1108ПА1 (12 разрядов) – 0,4 мкс, К118ПА1 (8 разрядов) – 0,02 мкс (разряды двоичные).

Для цифровых приборов повышенной точности ЦАП строят на базе внешних резисторов высокой точности и стабильности, таких как СЭС-10, у которых погрешность 0,002; 0,005 и 0,01 %. Применяют резисторные микросхемы с малым ТКС типа Р2 – 69 и нестабильностью 0,005 % и  $\text{TKC} = 3 \cdot 10^{-6}/1^\circ\text{C}$

Отечественная промышленность выпускает также прецизионные преобразователи напряжение – частота (ПНЧ)  $U \rightarrow f$  и  $f \rightarrow U$  (ИС КР1108ПП1), которые дополняют возможности ПКА.

### Контрольные вопросы

1. Какие операции содержит процедура аналого-цифрового преобразования?
2. Как следует выбирать период дискретизации?
3. Поясните метод последовательного счета, его достоинства и погрешности.
4. Поясните метод последовательного приближения, его достоинства и погрешности.
5. Поясните метод считывания, его достоинства и погрешности.
6. Каковы особенности комбинированных методов?
7. Назовите метрологические характеристики АЦП.
8. Как проводят поверку АЦП?
9. Назовите виды ПКА и основной принцип работы каждого.

## Лекция 13. ПРИМЕРЫ СТРУКТУР ПОГРЕШНОСТЕЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

### *1. Пример структуры погрешности измерительного канала*

Пусть требуется оценить погрешность измерительного канала, который состоит из трех последовательно соединенных узлов: реостатного датчика  $D$ , усилителя  $U$  и регистратора  $P$ . Погрешность реостатного датчика с сопротивлением  $R_d = 200$  Ом нормирована в его паспорте границей максимального значения приведенной погрешности (0,15 %). Предполагается, что его погрешность аддитивна. Датчик питается напряжением 200 мВ через стабилизатор напряжения с коэффициентом стабилизации  $K=25$  от общего с усилителем стандартного нестабилизированного блока питания. Усилитель предназначен для обеспечения линейности характеристики канала. Об усилителе известно, что он выполнен в виде эмиттерного повторителя и благодаря глубокой отрицательной обратной связи коэффициент влияния колебаний напряжения питания на коэффициент усиления снижен до значения  $\pm 0,3 \text{ \%}/(10 \text{ \%}\Delta U/U)$ , а влияние температуры приводит к смещению его нуля на  $\pm 0,2 \text{ \%}/10 \text{ К}$ . В качестве регистратора использован электронный прибор класса точности 0,5. Параллельно с аналоговым регистратором включен цифровой вольтметр класса точности 0,2/0,1.

При расчете погрешностей канала нужно выбрать для каждой составляющей соответствующий закон распределения, найти СКО и определить вид погрешности (аддитивная или мультипликативная). Рассмотрим отдельные составляющие.

1. Погрешность от наводки на линию связи может быть приближенно рассчитана следующим образом. При присоединении к линии электронного вольтметра с входным сопротивлением 1 МОм на его входе возникало падение напряжения 1,6 В, т.е. через него проходил ток  $I = 160$  мкА. При замыкании линии на датчик сопротивлением  $R_d = 200$  Ом падение напряжения на нем от этого тока составит  $U = 0,32$  мВ. Таким образом, приведенная погрешность от наводки при максимальном сигнале с датчика будет равна 0,16 %. Закон распределения этой погрешности – арксинусоидальный. Погрешность, возникающая от наводки посторонних напряжений на вход измери-

тельного канала, как правило, является аддитивной, так как не зависит от величины измеряемого сигнала. Но наш случай – исключение. Сопротивление, которое замыкает вход измерительного усилителя, есть сопротивление нижней части реостатного датчика. При входной измеряемой величине, равной нулю, это сопротивление также равно нулю, поэтому напряжение наводки возрастает линейно с ростом входного сигнала, т.е. в данном случае (как исключение из общего правила) погрешность от наводки оказывается мультипликативной.

2. Основная погрешность датчика нормирована по паспорту максимальным значением 0,15 %. Для того чтобы от этого значения перейти к СКО, необходимо знание вида закона распределения погрешности. Основной погрешностью является погрешность дискретности, поэтому распределение погрешности можно считать близким к равномерному. Тогда 0,15 % можно считать половиной ширины этого равномерного распределения, и СКО составляет 0,087 %.

3. Температурная погрешность датчика в его паспорте не указана, так как у самого датчика она отсутствует. Но у нас датчик с  $R_d = 200$  Ом включен последовательно с двумя жилами медной линии сопротивлением 2 Ом каждая. При изменении температуры в цехе, где проложена линия связи, в диапазоне  $(20 \pm 15)$  °С и температурном коэффициенте меди  $\pm 4$  %/10 К изменение сопротивления каждой из жил составит 0,12 Ом, что по отношению к  $R_d = 200$  Ом равно 0,06 %, т.е. соизмеримо с другими погрешностями. Эта погрешность может быть исключена изменением схемы включения датчика.

Для перехода от вычисленного выше максимального значения этой погрешности 0,06 %, возникающего при предельных значениях температуры 5 или 35 °С, к СКО необходимо знать закон распределения температуры в испытательном цехе. Если закон распределения считать нормальным, тогда искомая СКО составляет 0,026 %.

4. Погрешность датчика от колебаний напряжения питания – мультипликативная и распределена по треугольному закону. Максимальное значение этой погрешности составляет 0,6 %; СКО – 0,245 %.

5. Погрешность коэффициента передачи усилителя – мультипликативная и распределена также по треугольному закону. Ее максимальное значение составляет 0,45 %, а СКО – 0,184 %.

6. Погрешность смещения нуля усилителя при колебании температуры – аддитивная, а закон распределения – равномерный. Максимальное значение этой погрешности составляет 0,06 %, а СКО – 0,034 %.

7. Основная погрешность аналогового регистратора определяется его классом точности. Однако в отличие от датчиков, погрешность которых, как правило, нормируется без запаса на старение, погрешность всех измерительных приборов нормируется с 25%-м запасом на старение, т.е. фактическая погрешность нового, только что выпущенного заводом прибора составляет не больше 0,8. В нашем случае используется новый регистратор, и при классе точности 0,5 его погрешность составляет не более 0,4 %. Погрешность потенциометра определяется погрешностью реохорда, поэтому она аддитивна, а закон ее распределения, как и у реостатного датчика, будем считать равномерным с шириной 0,4 %. Тогда СКО этой погрешности составляет 0,23 %.

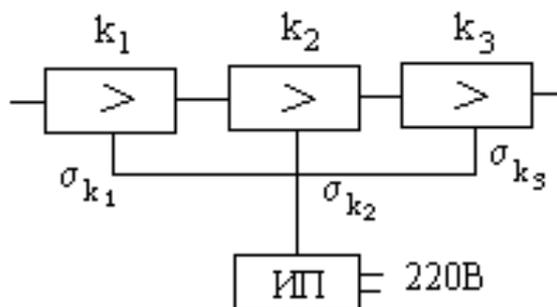
8. Температурная погрешность регистратора проявляется в виде смещения нуля на  $-0,1 \text{ \%}/10 \text{ К}$ , она также аддитивна и при принятом равномерном законе распределения температуры шириной 3 К ее СКО составляет 0,017 %.

9. Погрешность цифрового вольтметра нормирована двучленной формулой, ее приведенное значение равно 0,1 % при  $x = 0$  и линейно возрастает до 0,2 % в конце шкалы.

Расчет результирующей погрешности канала сводится к вычислению приведенной погрешности при  $x = 0$ , которая складывается только из аддитивных составляющих, и приведенной погрешности в конце диапазона, которая складывается из всех составляющих. Эти операции придется проделать дважды: один раз – для канала с аналоговым регистратором, а другой раз – для канала с цифровым регистратором. Выбор метода суммирования зависит от того, являются ли погрешности коррелированными или независимыми. Чтобы не допустить ошибок, необходимо сразу выделить коррелированные погрешности и произвести их алгебраическое сложение с учетом знаков. Коррелированные – те погрешности, которые вызываются одной и той же общей причиной, а поэтому имеют одинаковую форму закона распределения, которая остается справедливой и для их алгебраической суммы.

Например, для многокаскадного усилителя (рисунок) коэффициент усиления  $k=k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$  при нестабильном питании изменяется коррелированно в каждом каскаде, т.е. СКО суммируются алгебраически.

Когда суммируют погрешности, возможно отбрасывание отдельных составляющих, если их вклад в измеряемую погрешность не превышает 5 % (правило ничтожной погрешности). Если имеется одна составляющая, которая в пять раз меньше наибольшей, то ее можно отбросить. Можно отбросить две составляющие, если они в семь раз меньше наибольшей. Можно отбросить четыре составляющие, если они в восемь раз меньше наибольшей.



## ***2. Пример структуры погрешности измерения напряжения постоянного тока на выходе резистивного делителя***

Погрешность измерения выходного напряжения делителя определяется суммой составляющих:

- 1) медленный разряд батареи: инструментальная, систематическая, статическая, мультипликативная;
- 2) внутреннее сопротивление батареи: инструментальная, систематическая, статическая, мультипликативная;
- 3) наводки на провода соединительные (помехи от ЭМП): инструментальная, случайная, динамическая (нет конца случайного процесса), аддитивная;
- 4) сопротивление проводов: инструментальная, систематическая, статическая, мультипликативная;
- 5) окисление контактов (резистивные потери): инструментальная, случайная, статическая, мультипликативная;
- 6) термоЭДС в соединениях: инструментальная, систематическая, статическая, аддитивная;
- 7) внутреннее сопротивление вольтметра: методическая, систематическая, статическая, мультипликативная;
- 8) основная погрешность аналогового вольтметра (включая погрешности установки нуля и калибровки прибора): инструментальная, случайная, статическая, может быть аддитивной или мультипликативной (по техописанию);

9) дополнительная погрешность прибора из-за отклонения температуры от нормальных условий: инструментальная, случайная, статическая, может быть аддитивной или мультипликативной;

10) погрешность считывания показаний: субъективная, случайная, динамическая (не ожидает окончания переходного процесса), может быть аддитивной или мультипликативной.

*Измерение коэффициента передачи делителя (затухания):*

а) в относительных единицах –  $K=U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$  (например 0,5);

б) или в децибелах –  $K=20 \cdot \lg U_{\text{ВХ}}/U_{\text{ВЫХ}}$  (например 6 дБ).

*Структура погрешности включает:*

- погрешности измерения входного и выходного напряжения (пп. 1 – 10);

- погрешности косвенных измерений (суммирование погрешностей прямых измерений выходного и входного напряжений делителя);

- погрешности вычислений и округления расчетов.

### **3. Классификация средств измерений**

Электронные средства измерений согласно ГОСТ 15094-86 представлены в таблице.

Подгруппа	Вид	Наименование
А—приборы для измерения силы тока	A2	Амперметры постоянного тока
	A3	Амперметры переменного тока
	A9	Преобразователи тока
Б—источники питания для измерений	B2	Источники переменного напряжения (тока)
	B5	Источники постоянного напряжения (тока)
	B6*	Источники питания с регулируемыми параметрами
	B7*	Источники постоянного, переменного тока, универсальные
В—приборы для измерения напряжения	B1*	Установки или приборы для поверки вольтметров
	B2	Вольтметры постоянного напряжения
	B3	Вольтметры переменного напряжения
	B4	Вольтметры импульсного напряжения
	B6	Вольтметры селективные
	B7	Вольтметры универсальные
	B8	Измерители отношения, разности, нестабильности напряжения
	B9	Преобразователь напряжения

*Продолжение таблицы*

Подгруппа	Вид	Наименование
Г—генераторы измерительные	Г2*	Генераторы шумовых сигналов
	Г3	Генераторы сигналов НЧ
	Г4	Генераторы сигналов
	Г5	Генераторы импульсов
	Г6	Генераторы сигналов сложной формы
	Г7	Синтезаторы частоты
	Г8*	Генераторы качающейся частоты
	Г9	Генераторы испытательных импульсов
	Д—приборы для измерения ослаблений	Д1
Д2*		Аттенюаторы резисторные, емкостные
Д3*		Аттенюаторы поляризованные
Д4*		Аттенюаторы предельные
Д5*		Аттенюаторы поглощающие
Д6*		Аттенюаторы электрические управляемые
Д8*		Измерители ослаблений
Е—приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными	Е1*	Установки или приборы для поверки измерителей параметров компонентов и цепей
	Е3	Измерители индуктивности
И—приборы для импульсных измерений	И1*	Установки или приборы для поверки
	И2*	Измерители временных интервалов
	И4	Измерители параметров импульсов
	И9	Преобразователи импульсных сигналов
К—установки измерительные, системы измерительные автоматизированные	К2	Установки измерительные
	К3*	Установки измерительные автоматизированные комплексные
	К4*	Приборы (блоки) измерительных установок
	К5*	Приборы комплексных автоматизированных измерительных установок
	К6*	Системы измерительные автоматизированные
Л—приборы для измерения параметров электровакуумных, полупроводниковых приборов и микросхем	Л2	Измерители параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем
	Л3*	Измерители параметров электровакуумных приборов
	Л4	Измерители шумовых параметров полупроводниковых приборов

Продолжение таблицы

Подгруппа	Вид	Наименование
М—прибор для измерения мощности	M1*	Установки или приборы для поверки ваттметров
	M2	Ваттметры проходящей мощности
	M3	Ваттметры поглощаемой мощности
	M5*	Преобразователи приемные (головки)
Н—меры электрических величин	H2	Меры (набор мер) пассивных электрических величин
	H3	Средства измерений для воспроизведения электрических величин элементов и трактов с распределенными параметрами
	H4	Калибраторы постоянного напряжения (тока)
	H5	Калибраторы переменного напряжения (тока)
	H6	Калибраторы фаз
	H7	Калибраторы мощности
	П—приборы для измерения напряженности поля, плотности потока энергии, радиопомех и параметров антенн	П1*
П3		Измерители напряженности электромагнитного поля
П4		Измерители радиопомех
П5		Приемники измерительные
П6		Антенны измерительные
П7		Измерители параметров антенн
Р—приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными		R1
	R2	Измерители модулей коэффициентов передачи и отражения
	R3*	Измерители полных сопротивлений
	R4	Измерители комплексных коэффициентов передачи и отражения
	R5	Измерители параметров линий передач
С—приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигналов и спектров	S1	Осциллографы
	S2*	Измерители коэффициента амплитудной модуляции
	S3	Измерители модуляции
	S4	Анализаторы спектров
	S6	Измерители коэффициента гармоник
	S7	Осциллографы стробоскопические
	S8	Осциллографы запоминающие
	S9*	Осциллографы специальные

*Продолжение таблицы*

Подгруппа	Вид	Наименование
Т—генераторы цифровых сигналов	T2	Генераторы псевдослучайных последовательностей импульсов
	T3	Генераторы кодовых комбинаций импульсов
У—усилители измерительные	У2	Усилители селективные
	У3	Усилители переменного напряжения
	У4*	Усилители НЧ
	У5	Усилители постоянного напряжения
	У6	Усилители мощности
	У7*	Усилители универсальные
Ф—приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания (ГВЗ)	Ф1*	Установки или приборы для поверки измерителей разности фаз и ГВЗ
	Ф2	Измерители разности фаз
	Ф4	Измерители группового времени запаздывания
	Ф5	Измерители разности фаз импульсные
Х—приборы для наблюдения характеристик радиоустройств	X1	Приборы для наблюдения АЧХ
	X2*	Приборы для исследования переходных характеристик
	X3*	Приборы для исследования ФЧХ
	X5	Измерители характеристик шума
	X6	Приборы для исследования вероятностных характеристик случайных процессов
Ц—анализаторы потока цифровых данных	Ц2	Анализаторы логических состояний и временных диаграмм
	Ц3	Анализаторы сигнатур
	Ц4	Анализаторы кодовых последовательностей
Ч—приборы для измерения частоты и времени	Ч1	Меры (стандарты) частоты и времени
	Ч2	Частотомеры резонансные
	Ч3	Частотомеры электронно-счетные
	Ч5	Переносчики частоты
	Ч5*	Преобразователи, синхронизаторы частоты
	Ч6*	Синтезаторы, делители и умножители частоты
	Ч7	Приёмники эталонных сигналов частоты и времени, компараторы частотные, фазовые
	Ч9	Преобразователи частоты

*Окончание таблицы*

Подгруппа	Вид	Наименование
Э*—измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов	Э1*	Трансформаторы
	Э2*	Переходы, соединители
	Э3*	Переключатели
	Э4*	Модуляторы
	Э5*	Направленные ответвители
	Э6*	Вентили ферритовые
	Э7*	Головки детекторные
	Э7*	Головки смесительные
	Э8*	Фильтры
Э9*	Нагрузки	
Я—блоки измерительных приборов	Я1	Для измерения силы тока, напряжения, параметров компенсаторов и цепей с сосредоточенными постоянными
	Я2	Для измерения параметров элементов и трактов с распределёнными постоянными; блоки приборов для измерения мощности
	Я3	Для измерения частоты и времени; блоки измерителей разности фаз и группового времени запаздывания
	Я4	Для наблюдения и исследования форм аналоговых сигналов и спектров
	Я5	Для источников питания
	Я6	Для измерения напряжённости поля, плотности потока энергии, радиопомех и параметров антенн; блоки измерительных усилителей
	Я7	Для генераторов; мер электрических величин; генераторов цифровых сигналов; для измерения ослабления
	Я8	Для измерителей характеристик радиоустройств; параметров электровакуумных, полупроводниковых приборов и интегральных микросхем; для импульсных измерений
	Я9	Для анализаторов потоков цифровых данных; преобразователей измерительных; для индикации результатов измерений; коммутаций

В обозначениях приборов цифры после тире – номер разработки. По нему нельзя сказать о качестве прибора. Буквы за номером – номер модификации (А, Б, В, Г). Дробь – вариант модификации серии, разрабатываемой одновременно. Вторая буква К означает то, что прибор комбинированный. В таком приборе помимо основных функций имеются дополнительные возможности.

---

\* Согласно ГОСТ 15094-86 с 01.01.87 при разработке и конструировании аппаратуры не применяются.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какова структура погрешности измерения коэффициента передачи усилителя (1000 Гц,  $K=100N$ ) с учетом составляющих: объект, субъект, метод, СИ, условия?
2. Назовите виды и наименования приборов подгрупп В, С и Ч.
3. Назовите виды и наименования приборов подгрупп М, Ф и Х.
4. Что можно сказать о приборах В7-34А, В7-39 и В2-38?
5. Что можно сказать о приборах СК4-56, С4-60, С6-11?
6. Что можно сказать о приборе В7-40/1?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в любой области науки, техники и производства невозможно обойтись без измерений. Ключевые вопросы теории и практики измерений на самом современном уровне изложены в различных учебниках и пособиях, подготовленных рядом видных метрологов страны. В рамках настоящего курса лекций автор попытался систематизировать традиционные и новые подходы, используемые в теории и практике измерений, а также не только предоставить студентам необходимые базовые сведения, но и развить у них принципы метрологического мышления в отношении всех аспектов измерений.

Современная дисциплина «Метрология и радиоизмерения» насыщена терминами, понятиями и методами из разных научных и технических областей, прежде всего математики, физики, теории цепей и сигналов, электродинамики, микроэлектроники и вычислительной техники. Студентам следует четко представлять, что в данном курсе все эти термины, понятия и методы взаимосвязаны и должны рассматриваться как единое целое.

Автор настоящего курса лекций, написанного в соответствии с требованиями образовательных стандартов и программой дисциплины «Метрология и радиоизмерения», не задавался целью дать исчерпывающие ответы на все вопросы теории и практики измерений. Ограниченный объем курса лекций не позволяет в должной мере рассмотреть все смежные темы метрологии и радиоизмерений. Среди них особого внимания, безусловно, заслуживают современные принципы построения РИП и способы обработки сигналов в цифровых приборах, которые будут рассмотрены во второй части курса лекций, посвященной конкретным задачам радиоизмерений.

Принципы построения приборно-модульных и крейтовых систем, работа виртуальных измерительных приборов изучаются студентами в других специальных дисциплинах, таких как «Интерфейсы и шины измерительных систем», «Автоматизированные системы испытаний средств связи», «Виртуальные и крейтовые системы сбора данных».

Автор надеется, что студенты, освоив материалы данного курса лекций, смогут, используя новейшую литературу и Интернет, самостоятельно изучить интересующие их дополнительные вопросы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 8.000 – 2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения. – Введ. 2001 – 01 – 01. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 5 с.
2. Басаков, М. И. Основы стандартизации, метрологии и сертификации : 100 экзаменационных ответов / М. И. Басаков. – М. ; Ростов н/Д : Март, 2003. – 256 с. – ISBN 5-241-00293-6.
3. Винокуров, В. И. Электрорадиоизмерения / В. И. Винокуров, С. И. Каплин, И. Г. Петелин. – М. : Высш. шк., 1986. – 351 с.
4. Дворяшин, Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения / Б. В. Дворяшин. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с. – ISBN 5-256-01020-4.
5. Зограф, И. А. Оценка погрешностей результатов измерений / И. А. Зограф, П. Ф. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. – ISBN 5-283-04513-7.
6. Клаассен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Клаассен. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с. – ISBN 5-901095-02-2.
7. Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений : пер. с англ. / Ф. Мейзда. – М. : Мир, 1990. – 535 с. – ISBN 5-03-001510-8.
8. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. для вузов / В. И. Нефедов [и др.]; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

Учебное издание

ПОЗДНЯКОВ Александр Дмитриевич

КУРС ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ»

Часть 1

Подписано в печать 07.10.08.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 9,53. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.