Федеральное агентство связи Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

Кафедра ЛС и ИТС

| | «УТ | ГВЕРЖДАЮ» |
|--------------------------------------|-------------------|---|
| | • | і кафедрой ЛС и ИТО ., проф. Андреев В.А |
| | «» | 2016 г |
| КОНСПЕКТ Ј | ІЕКЦИЙ | |
| ПО УЧЕБНОЙ ДИ | СЦИПЛИНЕ | |
| «Метрология, стандартизация и сертис | фикация в инфоког | ммуникациях» |
| | | |
| | | |
| | | |
| | Обсуждено на за | седании кафедры |
| | | 2016 г. |
| | протокол № | |

Содержание

| Введение | 5 |
|---|------|
| Раздел I. Основы метрологического обеспечения в телекоммуникациях | 6 |
| Лекция 1. Общие сведения из метрологии | |
| 1.1 Современное состояние измерительной техники в телекоммуникациях | |
| 1.2 Основные термины и определения в области метрологии | |
| 1.3 Физические величины и единицы | |
| 1.4 Уровни передачи | |
| Контрольные вопросы | |
| Лекция 2. Основные характеристики и методы измерений | |
| 2.1 Определения и классификация измерений | |
| 2.2 Классификация методов измерения | |
| 2.3 Основные характеристики измерений | |
| Контрольные вопросы | . 15 |
| Лекция 3. Система обеспечения единства измерений | . 16 |
| 3.1 Общие положения Государственной системы обеспечения единства измерений | |
| 3.2 Эталоны единиц физических величин | |
| 3.3 Стандартные образцы | |
| 3.4 Передача размеров единиц физических величин. Поверочные схемы | |
| 3.5 Способы поверки средств измерений | |
| Контрольные вопросы | |
| | |
| Раздел II. Погрешности и математическая обработка результатов измерений | 26 |
| Лекция 4. Классификация и методы учета погрешностей | |
| 4.1 Классификация погрешностей | |
| 4.2 Случайная погрешность | |
| 4.3 Методы обнаружения и исключения систематических погрешностей | |
| 4.4 Методы обнаружения и исключения грубых погрешностей | |
| 4.5 Суммирование систематических и случайных погрешностей | |
| 4.6 Погрешности косвенных измерений | |
| Контрольные вопросы | |
| Лекция 5. Обработка результатов измерений | |
| 5.1 Алгоритм обработки результатов измерений | |
| 5.2 Статистическая обработка прямых равноточных многократных измерений | |
| Контрольные вопросы | |
| Tomponibile Bonpoeti | |
| Раздел III. Средства измерений и классы точности | 35 |
| Лекция 6. Основы построения средств измерений | |
| 6.1 Классификация средств измерений | |
| 6.2 Нормирование погрешностей средств измерений. Классы точности | |
| 6.3 Стандартная форма записи результата однократных и многократных измерений. | |
| Контрольные вопросы | |
| Tomposibilitie Bompoeti | 5 / |
| Раздел IV. Измерения и анализ параметров сигналов | 30 |
| Лекция 7. Измерение тока и напряжения | |
| 7.1 Измеряемые параметры напряжений | |
| 7.2 Классификация вольтметров | |
| 7.3 Электромеханические приборы | |
| 7.4 Магнитоэлектрические приборы с преобразователями | |
| 7.5 Аналоговые электронные вольтметры | |
| 7.6 Цифровые электронные вольтметры. | |
| 1 1 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 | - 0 |

| 7.7 Цифровые микропроцессорные вольтметры | 60 |
|--|------|
| Контрольные вопросы | 60 |
| Лекция 8. Электронные осциллографы | |
| 8.1 Классификация и обобщенная структурная схема универсального электронного | |
| аналогового осциллографа | |
| 8.2. Виды разверток осциллографа | . 64 |
| 8.3. Осциллографические методы измерения параметров сигналов | 65 |
| 8.4. Калибровка осциллографа и рекомендации по выбору полосы пропускания КВО . | |
| 8.5. Некоторые разновидности электронных осциллографов | 67 |
| Контрольные вопросы | |
| Лекция 9. Генераторы измерительных сигналов | |
| 9.1 Классификация измерительных генераторов | |
| 9.2 Генераторы синусоидальных сигналов низкой частоты | |
| 9.2.1 Генераторы синусоидальных сигналов основной частоты | |
| 9.2.2 Генератор на биениях | |
| 9.2.3 Синтезаторы частоты | |
| 9.2.4 Цифро-аналоговые генераторы. | |
| 9.3 Генераторы синусоидальных сигналов высокой частоты и СВЧ – генераторы | |
| 9.4 Генераторы импульсов | |
| Контрольные вопросы | |
| Лекция 10. Измерение частоты и временных интервалов электрических сигналов . | |
| 10.1 Методы измерения частоты | |
| 10.2. Осциллографические методы измерения частоты | |
| 10.2.1. Измерение частоты методом линейной калиброванной развертки | |
| 10.2.2. Измерение частоты методом линейной развертки с внешним генератором | |
| разцовой частоты | |
| 10.2.3. Измерение частоты методом синусоидальной развертки | |
| 10.2.4. Измерение частоты методом круговой развертки | |
| 10.3 Резонансный и гетеродинный методы измерения частоты | |
| 10.4. Цифровые частотомеры и измерители временных интервалов | |
| Лекция 11. Измерение фазового сдвига | |
| | |
| 11.1. Общие положения | 95 |
| 11.2.1. Измерение угла сдвига фаз методом синусоидальной развертки | |
| 11.2.1. Измерение угла сдвига фаз методом синусоидальной развертки | |
| 11.3 Измерение фазового сдвига путём преобразования во временной интервал | |
| 11.4 Цифровые фазометры | |
| 11.4.1 Цифровые фазометры с преобразованием фазового сдвига в постоянное |) / |
| напряжение напражением фазового едвига в постоянное | 97 |
| 11.4.2 Цифровой фазометр с время-импульсным преобразованием за 1 период | |
| 11.4.3 Цифровой фазометр с время импульсным преобразованием за т период |)) |
| периодов | 100 |
| Контрольные вопросы | |
| Лекция 12. Измерение мощности электрических сигналов | |
| 12.1. Общие положения | |
| 12.2. Измерение мощности низкочастотных и высокочастотных колебаний | |
| 12.3. Измерение мощности СВЧ-колебаний | |
| 12.3.1. Измерение мощности СВЧ – колебаний ваттметрами поглощающего типа | |
| 12.3.2. Измерение мощности СВЧ-колебаний ваттметрами проходящей мощности . | |
| 12.4. Цифровые методы измерения мощности | |
| Контрольные вопросы | 113 |

| Лекция 13. Анализ спектра и измерение нелинейных искажений | 114 |
|--|-----|
| 13.1. Общие положения | |
| 13.2. Методы анализа спектра сигналов | |
| 13.3. Цифровые методы анализаторов спектра сигналов | |
| 13.4. Анализаторы спектра сигналов на цифровых фильтрах | |
| 13.5. Измерение нелинейных искажений | |
| Контрольные вопросы | |
| rrr | |
| Раздел V. Измерение параметров и характеристик электрических цепей | 125 |
| Лекция 14. Измерение параметров и характеристик электрических цепей | |
| 14.1. Общие положения | |
| 14.2. Методы измерения активных сопротивлений | |
| 14.2.1. Измерениесопротивлевий методом амперметра-вольтметра | |
| 14.2.2. Измерение активного сопротивления логометром | |
| 14.3. Мостовые схемы измерителей параметров элементов | |
| 14.3.1. Измерение параметров элементов на постоянном токе | |
| 14.3.2. Измерение индуктивностн, емкости и тангенса угла потерь мостами | 129 |
| переменного тока | 129 |
| 14.4. Резонансные измерители параметров элементов. Куметр | |
| 14.5. Метод дискретного счета. Цифровые измерители параметров элементов | |
| 14.5.1. Метод дискретного счета | |
| 14.5.2. Измерение параметров элементов методом уравновешивающего | 152 |
| преобразования | 135 |
| 14.5.3. Микропроцессорные цифровые автоматические приборы | |
| 14.6. Измерители амплитудно-частотных характеристик | |
| Контрольные вопросы | |
| rrr | |
| Раздел VI. Автоматизация измерений | 141 |
| Лекция 15. Автоматизация измерений. Информационно-измерительные приборы | |
| и системы | |
| 15.1 Общие сведения | |
| 15.2. Измерительные системы | 142 |
| 15.3 Виртуальные информационно-измерительные системы | |
| 15.4 Интеллектуальные измерительные системы | |
| Контрольные вопросы | |
| r | |
| Раздел VII. Основы технического регулирования, стандартизации и сертификации . | 154 |
| Лекция 16. Техническое регулирование. Стандартизация | |
| 16.1. Общие сведения о Федеральном законе РФ «О техническом регулировании» | |
| 16.2. Общие сведения о стандартизации | |
| 16.3. Цели стандартизации | |
| 16.4. Принципы стандартизации | |
| 16.5. Документы в области стандартизации | |
| 16.6. Национальный орган по стандартизации, технические комитеты | 102 |
| по стандартизации | 170 |
| Контрольные вопросы | |
| Лекция 17. Сертификация и подтверждение соответствия | |
| 17.1. Общие сведения о сертификации и подтверждении соответствия | |
| 17.1. Оощие сведения о сертификации и подтверждении соответствия | |
| 17.2. Цели подтверждения соответствия | |
| 17.3. Принципы подтверждения соответствия | |
| | |
| 17.5. Добровольное подтверждение соответствия | |

| 17.6. Обязательное подтверждение соответствия | 179 |
|---|-----|
| 17.7. Права и обязанности заявителя в области обязательного подтверждения | |
| соответствия | 181 |
| 17.8. Условия ввоза на территорию РФ продукции, подлежащей обязательному | |
| подтверждению соответствия и признание результатов подтверждения соответствия | 182 |
| Контрольные вопросы | 183 |
| Литература | 184 |

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Метрология, стандартизация и сертификация" включена в государственный общеобразовательный стандарт, относится к циклу общепрофессиональных дисциплин.

Целью и задачами преподавания дисциплины "Метрология, стандартизация и сертификация" (М, С и С) является изучение общих принципов построения системы метрологического обеспечения в телекоммуникационных системах. Поддержание характеристик телекоммуникационных систем в соответствии с требованиями стандартов требует применения большого количества разнообразных средств измерений (СИ), в том числе узкоспециализированных. Эксплуатация СИ требует организации метрологического обеспечения (МО), т.е. комплекса мер по обеспечению требуемой точности и единообразия измерений. В систему МО входят так же нормативная документация, стандарты, методики проведения измерений. Необходимым условием обеспечения высокой точности измерений является поверка СИ, которая должна производится в специализированной поверочной лаборатории.

Основные задачи дисциплины заключаются в изучении методов измерений основных параметров телекоммуникационных систем и элементов радиотехнических цепей и сигналов, принципов построения средств измерений, их отдельных элементов, способов обработки результатов измерений и обеспечения требуемой точности измерений в соответствии с Государственной системой обеспечения единства измерений в телекоммуникационных системах, основ технического регулирования, стандартизации, сертификации и подтверждения соответствия в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании»..

Содержание курса «Метрология, стандартизация и сертификация» охватывает основы измерений, метрологию, стандартизацию и сертификации, то есть тот круг вопросов, с которым инженеру приходится сталкиваться независимо от специализации. Вопросы измерений специфических для отдельных направлений телекоммуникаций рассматриваются в специальных курсах.

Курс «Метрология, стандартизация и сертификация» опирается на дисциплины: высшая математика (разделы дифференциального и интегрального исчисления, анализ функций); физика (понятия физической величины, системы единиц, электричества, магнетизма, спектрального анализа); теория электрических цепей (методы расчетов переходных процессов, электрических элементов, тока и напряжения); теория электросвязи (временной и спектральный анализ сигналов, кодирование, преобразование сигналов), цифровые методы обработки информации..

В результате изучения дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация" студенты должны:

- знать методы измерений основных параметров телекоммуникационных систем и их отдельных элементов;
 - уметь выбирать необходимые СИ для решения конкретных измерительных задач;
 - знать основные принципы построения и поверки СИ;
 - уметь рассчитывать погрешности СИ в реальных условиях эксплуатации;
- получить практические навыки в проведении измерений в телекоммуникационных системах.

РАЗДЕЛ І. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ

Лекция 1. Общие сведения из метрологии

1.1. Современное состояние измерений в телекоммуникациях

Процесс совершенствования измерительных технологий подчиняется общей тенденции усложнения высоких технологий в процессе их развития.

Задачи контроля и настройки работы сетей связи в современных телекоммуникациях идет двумя путями: первый – развитие систем внутренней диагностики узлов сетей, второй – применение современной измерительной техники.

Учитывая, что развитие средств связи идет очень динамично, разработка систем самодиагностики и их отработка несколько отстают от развития самих средств связи. Это приводит к тому, что роль измерительной техники на сетях связи повышается с развитием новых технологий, так как применение независимых от оборудования систем контроля в ряде случаев является единственно корректным решением.

Основными тенденциями в развитии современной измерительной техники являются:

- 1) расширение пределов измеряемых величин и повышение точности измерений;
- 2) разработка новых методов измерений и приборов с использованием новейших принципов действия;
- 3) внедрение автоматизированных информационно-измерительных систем, характеризуемых высокой точностью, быстродействием и надежностью;
- 4) интеграция, имеющая три основных направления:
 - внутренняя интеграция (размещение нескольких проборов в одном корпусе, их соединение в систему), обусловленная миниатюризацией вычислительных устройств и переходом к цифровым измерительным технологиям;
 - интеграция различных приборов и вычислительных средств в единый комплекс («локальные сети приборов») при использование стандарта HP-IB;
 - интеграция комплексов и локальных систем управления в единую сеть управления связью (TMN);

Измерительная техника на сетях современных телекоммуникаций имеет ряд особенностей:

- 1) очень широкий диапазон измеряемых величин, например, по мощности от долей микроватт до сотен киловатт; по напряжению от долей микровольт до сотен тысяч вольт; по сопротивлению от 10^{-6} до 10^{12} Ом и т.д.;
- 2) широкий диапазон рабочих частот от постоянного тока до 10^{15} Гц;
- 3) большое число измеряемых параметров, обуславливающих разнообразие измерительных приборов;
- 4) создание виртуальных сред сбора и обработки информации.

Современное развитие телекоммуникационных технологий можно охарактеризовать как технологическую научно-техническую революцию. **Измерительная технология (ИТ)** — совокупность методов, подходов к организации измерений и интерпретации результатов, конкретных методик, а также измерительных средств (средств измерений и средств контроля), необходимых для качественного обслуживания соответствующего направления развития технологии средств связи.

Особенности ИТ:

- 1) высокая скорость смены технологий;
- 2) высокая специализация и динамичное изменение рынка современной измерительной техники;
- 3) появление совершенно нового класса измерительных проборов (анализаторов протоколов и логического взаимодействия интеллектуальных устройств сетей связи и др.)

1.2. Основные термины и определения в области метрологии

Термин метрология произошел от греческих слов: цетроу – мера и λογοζ – учение, слово.

Метрология — наука об изменениях, об обеспечении их единства, о способах достижения требуемой точности, а также о методах и средствах достижения указанных целей. Единство измерений — это состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Задачи, решаемые метрологией, можно условно разделить на научные, практические, законодательные. В соответствии с этим метрологию делят на общую, законодательную и прикладную.

Научные задачи заключаются в разработке общей теории измерений, совершенствования системы единиц, разработке эталонов, исследованию вопросов математической обработки результатов измерений и т.п. Они решаются в научных метрологических учреждениях нашей страны. Эти задачи решает общая или теоретическая метрология.

Законодательная метрология — это раздел метрологии, включающий комплексы взаимосвязанных и взаимообусловленных общих правил, требований и норм, а также другие вопросы, нуждающиеся в регламентации и контроле со стороны государства, направленные на обеспечение единства измерений и единообразие средств измерений.

Законодательная метрология реализуется через стандартизацию (установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении условий эксплуатации (использования) и требований безопасности).

Прикладная метрология занимается решением практических задач. К практическим задачам метрологии относятся производство и выпуск в обращение рабочих средств измерений, обеспечивающих определение с требуемой точностью характеристик продукции, государственные испытания средств измерений, организация ведомственной поверки средств измерений, ревизия состояния измерений на предприятиях и организациях.

Главное практическое применение метрологии - **поверочное дело** — передача истинных значений единиц от эталонов к рабочим мерам и измерительным приборам, применяемым в науке, технике и других областях народного хозяйства. Процесс и правила передачи единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений определяется поверочной схемой.

Основными задачами метрологии являются:

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

Одной из главных задач метрологии является обеспечение единства измерений. **Единство измерений** — состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью. Это может быть выполнено при соблюдении двух основополагающих условий:

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

Метрологическое обеспечение — установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для обеспечения единства и требуемой точности измерения

Все виды работ производятся метрологической службой, которую возглавляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (в него преобразован Госстандарт России). В настоящее время Россия имеет развитую метрологическую службу. Главным центром Государственной метрологической службы является Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС), осуществляющий разработку научно-технических и организационных основ метрологического обеспечения, развитием эталонной базы, проведением государственных испытаний, стандартизацией в области измерений, работами по международному сотрудничеству в области метрологии.

Международное сотрудничество в области метрологии непрерывно развивается, что привело к учреждению в 1956 г. Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ). Россия активно участвует в работе этой и других международных метрологических организаций.

1.3. Физические величины и единицы

Физическая величина — свойство физических объектов, общее в качественном отношении многим объектам, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них. Качественная сторона понятия «физическая величина» определяет ее род (например, электрическое сопротивление как общее свойство проводников электричества), а количественная — ее «размер» (значение электрического сопротивления конкретного проводника, например R = 100 Om). Числовое значение результата измерения зависит от выбора единицы физической величины.

Физическим величинам присвоены буквенные символы, используемые в физических уравнениях, выражающих связи между физическими величинами, существующие в физических объектах.

Размер физической величины — количественная определенность величины, присущая конкретному предмету, системе, явлению или процессу.

Значение физической величины – оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц измерения. Числовое значение физической величины – отвлеченное число, выражающее отношение значения физической величины к соответствующей единице данной физической величины (например, 220 В — значение амплитуды напряжения, причем само число 220 и есть числовое значение). Именно термин «значение» следует применять для выражения количественной стороны рассматриваемого свойства. Неправильно говорить и писать «величина тока», «величина напряжения» и т. д., поскольку ток и напряжение сами являются величинами (правильным будет применение терминов «значение силы тока», «значение напряжения»).

При выбранной оценке физической величины ее характеризуют истинным, действительным и измеренным значениями.

Истинным значением физической величины называют значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Определить экспериментально его невозможно вследствие неизбежных погрешностей измерения.

Это понятие опирается на два основных постулата метрологии:

- истинное значение определяемой величины существует и оно постоянно;
- истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.

На практике оперируют понятием действительного значения, степень приближения которого к истинному значению зависит от точности средства измерения и погрешности самих измерений.

Действительным значением физической величины называют ее значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для определенной цели может быть использовано вместо него.

Под *измеренным значением* понимают значение величины, отсчитанное по индикаторному устройству средства измерения.

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

Единицы физических величин делят на основные и производные и объединяют в *системы единиц* физических величин. Единица измерения устанавливается для каждой из физических величин с

учетом того, что многие величины связаны между собой определенными зависимостями. Поэтому лишь часть физических величин и их единиц определяются независимо от других. Такие величины называют основными. Остальные физические величины — производные и их находят с использованием физических законов и зависимостей через основные. Совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, называется системой единиц физических величин. Единица основной физической величины является основной единицей системы.

Международная система единиц (система СИ; SI — франц. *Systeme International*) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г.

В основу системы СИ положены семь основных и две дополнительные физические единицы. Основные единицы: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Единицы Международной системы СИ

| Единицы | | | | | |
|--------------------------|-----------------------------|---------------|-----------|------|--|
| Наименование | ие Размерность Наименование | | Обозначен | ие | |
| Паименование | Размерность Наименование | международное | русское | | |
| | Oc | новные | | | |
| Длина | L | метр | m | M | |
| Macca | M | килограмм | kg | КГ | |
| Время | T | секунда | S | С | |
| Сила электрического тока | I | ампер | A | A | |
| Температура | Θ | кельвин | К | К | |
| Количество вещества | N | МОЛЬ | mol | моль | |
| Сила света | J | кандела | cd | кд | |
| Дополнительные | | | | | |
| Плоский угол | - | радиан | rad | рад | |
| Телесный угол | - | стерадиан | sr | ср | |

Метр равен расстоянию, проходимому светом в вакууме за 1/299792458 долю секунды.

Килограмм – единица массы, определяемая как масса международного прототипа килограмма, представляющего цилиндр из сплава платины и иридия.

Секунда равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133.

Aмпер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывал бы силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н (ньютон) на каждом участке проводника длиной 1 м.

Кельвин – единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды, т. е. температуры, при которой три фазы воды – парообразная, жидкая и твердая – находятся в динамическом равновесии.

Mоль — количество вещества, содержащего столько структурных элементов, сколько содержится в углероде-12 массой $0.012~\rm kr$.

Kандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц (длина волны около 0,555 мкм), чья энергетическая сила излучения в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср (ср — стерадиан).

Дополнительные единицы системы СИ предназначены только для образования единиц угловой скорости и углового ускорения. К дополнительным физическим величинам системы СИ относят плоский и телесный углы.

Радиан (рад) — угол между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна этому радиусу. В практических случаях часто используют такие единицы измерения угловых величин:

градус —
$$1^{\circ}$$
 = $2\pi/360$ рад = $1,7453 \cdot 10^{-2}$ рад;
минута — $1' = 1^{\circ}/60 = 2,9088 \cdot 10^{-4}$ рад;
секунда — $1''$ = $1'/60 = 1^{\circ}/3600 = 4,8481 \cdot 10^{-6}$ рад;
радиан — 1 рад = $57^{\circ}17'45'' = 57,2961^{\circ} = (3,4378 \cdot 10^{3})' = (2,0627 \cdot 10^{5})''$.

Стерадиан (ср) – телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на ее поверхности площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Измеряют телесные углы с помощью плоских углов и расчета

$$\alpha = 2\pi \left[1 - \cos(\frac{\varphi}{2}) \right],\tag{1.1}$$

где α — телесный угол; φ — плоский угол при вершине конуса, образованного внутри сферы данным телесным углом.

Производные единицы системы СИ образуют из основных и дополнительных единиц.

В области измерений электрических и магнитных величин имеется одна основная единица – ампер (А). Через ампер и единицу мощности – ватт (Вт), единую для электрических, магнитных, механических и тепловых величин, можно определить все остальные электрические и магнитные единицы. Однако на сегодняшний день нет достаточно точных средств воспроизведения ватта абсолютными методами. Поэтому электрические и магнитные единицы основываются на единицах силы тока и производной от ампера единицы емкости – фарада.

К производным от ампера физическим величинам также относятся:

- единица электродвижущей силы (ЭДС) и электрического напряжения вольт (В);
- единица частоты герц (Гц);
- единица электрического сопротивления ом (Ом);
- единица индуктивности и взаимной индуктивности двух катушек генри (Гн).

В табл. 1.2 и 1.3 приведены производные единицы, наиболее употребляемые в телекоммуникационных системах и радиотехнике.

Таблица 1.2. Производные единицы СИ

| Величина | | Единица | | |
|---|--------------------------|--------------|--------------------|---------|
| | | | Обозначение | |
| Наименование | Размерность | Наименование | междуна- родное | русское |
| Частота | T^{-1} | герц | Hz | Гц |
| Энергия, работа, количество теплоты | L^2MT^{-2} | джоуль | J | Дж |
| Сила, вес | LMT ⁻² | ньютон | N | Н |
| Мощность, поток энергии | L^2MT^{-3} | ватт | W | Вт |
| Количество электричества | TI | кулон | С | Кл |
| Электрическое напряжение, электродвижущая сила (ЭДС), потенциал | $L^2MT^{-3}I^{-1}$ | вольт | V | В |
| Электрическая емкость | $L^{-2}M^{-1}T^4I^2$ | фарад | F | Ф |
| Электрическое сопротивление | $L^2MT^{-3}I^{-2}$ | OM | Ω | Ом |
| Электрическая проводимость | $L^{-2}M^{-1}T^{3}I^{2}$ | сименс | S | См |
| Магнитная индукция | $MT^{-2}I^{-1}$ | тесла | T | Тл |
| Поток магнитной индукции | $L^2MT^{-2}I^{-1}$ | вебер | Wb | Вб |
| Индуктивность, взаимная индуктивность | $L^2MT^{-2}I^{-2}$ | генри | Н | Гн |

Таблица 1.3. Единицы СИ, применяемые в практике измерений

| Величина | | Единица | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------|
| | | Единица изме- | е- Обозначение | |
| Наименование | Размерность | рения | междуна- | nuccicoa |
| | | | родное | русское |
| Плотность электрического тока | $L^{-2}I$ | ампер на квад- | A/m^2 | A/m^2 |
| | | ратный метр | | |
| Напряженность электрического поля | LMT ⁻³ I ⁻¹ | вольт на метр | V/m | В/м |
| Абсолютная диэлектрическая проницае- | $L^{3}M^{-1}T^{4}I^{2}$ | фарад на метр | F/m | Φ/M |
| мость | | | | |
| Удельное электрическое сопротивление | $L^3MT^{-3}I^{-2}$ | ом на метр | Ω ·m | Ом·м |
| Полная мощность электрической цепи | L^2MT^{-2} | вольт-ампер | V·A | B∙A |
| Реактивная мощность электрической | L^2MT^{-3} | вар | var | B·Ap |
| цепи | L WII | | | _ |
| Напряженность магнитного поля | L ⁻¹ I | ампер на метр | A/m | A/M |

Сокращенные обозначения единиц как международных, так и русских, названных в честь великих ученых, пишутся с заглавных букв, например ампер — A; ом — Oм; вольт — B; фарад — Φ . Для сравнения: метр — M, секунда — M, силограмм — M.

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

Кратная единица физической величины — единица, большая в целое число раз системной, например килогерц (10^3 Гц). *Дольная единица физической величины* — единица, меньшая в целое число раз системной, например микрогенри (10^{-6} Гн).

Наименования кратных и дольных единиц системы СИ содержат ряд приставок, соответствующих множителям (табл. 1.4).

Таблица 1.4. **Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц СИ**

| CH | | | | | |
|-------------------|-----------|-----------------------|---------|--|--|
| Множитель | Приставка | Обозначение приставки | | | |
| | | международное | русское | | |
| 10^{18} | экса | E | Э | | |
| 10^{15} | пета | P | П | | |
| 10^{12} | тера | T | T | | |
| 109 | гига | G | Γ | | |
| 10^{6} | мега | M | M | | |
| 10^{3} | кило | k | К | | |
| 10^{2} | гекто | h | Γ | | |
| 10^{1} | дека | da | да | | |
| 10 ⁻¹ | деци | d | Д | | |
| 10 ⁻² | санти | c | c | | |
| 10 ⁻³ | милли | m | M | | |
| 10 ⁻⁶ | микро | μ | МК | | |
| 10-9 | нано | n | Н | | |
| 10 ⁻¹² | пико | p | П | | |
| 10 ⁻¹⁵ | фемто | f | ф | | |
| 10 ⁻¹⁸ | атто | a | a | | |

1.4 Уровни передачи

В телекоммуникациях широко используются безразмерные логарифмические единицы передачи.

Различают абсолютные нулевые уровни, абсолютные, относительные и измерительные уровни передачи.

1. Абсолютные нулевые уровни установлены для активных мощностей $P_0 = 1$ мВт, для кажущихся мощностей -1 мВА. Абсолютные нулевые уровни по напряжению и току соответственно равны

$$U_0 = \sqrt{P_0 R_H}, \quad I_0 = \sqrt{\frac{P_0}{R_H}}$$
 (1.2)

При $R_H = R_0 = 600 \text{ Ом имеем}$

$$U_0 = 0,775 \text{ B}$$
 и $I_0 = 1,29 \text{ мA}$.

2. **Абсолютные уровни передачи** напряжения, тока или мощности определяются по отношению к абсолютным нулевым уровням следующим образом: по напряжению

$$L_{u} = 20\lg(\frac{\mathbf{U}}{\mathbf{U}_{0}}), \, \mathsf{д}\mathsf{Б} \tag{1.3}$$

по току

$$L_I = 20\lg(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I}_0}), \,\mathrm{д}\mathrm{Б}$$
 (1.4)

по мощности

$$L_P = 10\lg(\frac{P}{P_0}), \, \text{дБ}$$
 (1.5)

3. Относительные уровни напряжения, тока и мощности определяются логарифмами отношений

$$L_{u12} = 20\lg(\frac{U_1}{U_2}); L_{I12} = 20\lg(\frac{I_1}{I_2}); L_{P12} = 10\lg(\frac{P_1}{P_2}),$$
 (1.6)

где U_1 , I_1 , P_1 — напряжение, ток и мощность в какой-либо точке измерений 1;

 U_2 , I_2 , P_2 – напряжение, ток и мощность в точке 2.

Относительный уровень можно определить через абсолютные уровни:

$$L_{u12} = 20\lg(\frac{U_1}{U_2}) = 20\lg(\frac{U_1U_0}{U_2U_0}) = 20\lg(\frac{U_1}{U_0}) - 20\lg(\frac{U_2}{U_0}) = L_{U2} - L_{U1}$$
(1.7)

4. **Измерительный уровень** определяется как абсолютный уровень напряжения в измеряемой точке цепи, если к её входу подведено напряжение с уровнем 0 дБ.

При относительных измерениях широко используется внесистемная безразмерная единица – децибел (дБ), определяемая:

при сравнении напряжений

1 дБ =
$$20 \lg(U_2/U_1)$$
, при $U_2/U_1 = 10^{1/20} = 1,122$,

а при сравнении мощностей

1 дБ =
$$10\lg(P_2/P_1)$$
, при $P_2/P_1 = 10^{1/10} = 1,259$.

Контрольные вопросы

- 1. Каковы основные особенности и тенденции в развитии современной измерительной техники?
- 2. Что такое измерительная технология, каковы ее особенности?
- 3. Что такое метрология, каковы ее основные разделы и задачи?
- 4. Что означают понятия: единство измерений; метрологическое обеспечение?
- 5. Что такое физическая величина, ее размер, единица, истинное и действительное значения?
- 6. Как определяются уровни передачи: абсолютные нулевые; абсолютные; относительные и измерительные?

Лекция 2. Основные характеристики и методы измерений

2.1 Определения и классификация измерений.

Измерение — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Под измерением понимается процесс физического сравнения данной величины с некоторым её значением, принятым за единицу измерения.

Измерение — познавательный процесс, заключающийся в сравнении опытным путём измеряемой величины с некоторым значением, принятым за единицу измерения.

Из определения измерений следуют признаки измерений:

- 1) измеряются только физические величины, т.е. параметры реальных объектов;
- 2) измерение требует проведения опытов;
- 3) для проведения опытов требуются особые технические средства- средства измерений;
- 4) результатом измерения является значение физической величины.

Основное уравнение измерения имеет следующий вид:

$$A = a X, (2.1)$$

где A – измеряемая величина, a – единица измерения; X – численное значение измеряемой величины при выбранной единице измерения. Из уравнения следуют слагаемые процесса измерения:

- 1) воспроизведение единицы физической величины в виде меры;
- 2) преобразование измеряемого сигнала;
- 3) сравнение измеряемой величины с мерой;
- 4) фиксация результата измерения.

В зависимости от способа нахождения значения измеряемой величины измерения делят на:

- 1) прямые;
- 2) косвенные:
- 3) совокупные;
- 4) совместные.

Прямым называется измерение, когда искомое значение физической величины находится непосредственно из опытных данных. Следует отметить, что часто под прямыми понимаются такие измерения, при которых не производится промежуточных преобразований. Это, например, измерение напряжения и силы тока известными электроизмерительными приборами — вольтметрами и амперметрами. Прямые измерения очень распространены в метрологической практике. Математически прямые измерения можно охарактеризовать элементарной формулой

$$A = x, (2.2)$$

где x — значение величины, найденное путём её измерения и называемое *результатом измерения*.

Косвенным называется измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Косвенные измерения можно охарактеризовать следующей формулой:

$$A = f(x_1, x_2, ..., x_m), (2.3)$$

где x_1 , x_2 ,..., x_m – результаты прямых измерений величин, связанных известной функциональной зависимостью f с искомым значением измеряемой величины A.

Косвенные измерения характерны для практики измерений в телекоммуникационных системах, например, измерение мощности методом амперметра-вольтметра, определение резонансной частоты колебательного контура по результатам прямых измерений ёмкости и индуктивности контура, определение расстояния до места неоднородности в оптическом кабеле методом обратного рассеяния и т.д.

При совокупных измерениях одновременно измеряют несколько одноимённых величин, а их искомые значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. Например, измерения, при которых размер ёмкости набора конденсаторов находят по известному значению ёмкости одного конденсатора и результатам прямых сравнений размеров ёмкостей различных сочетаний конденсаторов.

Совместные измерения состоят в одновременном измерении двух или нескольких неодно-имённых величин для нахождения зависимости между ними.

Пример совместных измерений – определение зависимости сопротивления резистора от температуры.

2.2 Классификация методов измерения

Существует два основных метода измерения:

- 1. **Метод непосредственной оценки**, при котором размер измеряемой величины находится по шкале, по цифровому табло или экрану прибора, например, измерение напряжения вольтметром.
- 2. Метод сравнения с мерой, при котором значение измеряемой величины сравнивается со значением величины, воспроизводимой мерой. Данный метод имеет следующие разновидности.
 - 2.1) *Метод противопоставления*, при котором значение величин измеряемой и воспроизводимой мерой, воздействует на прибор сравнения и с его помощью устанавливается отношение между этими величинами.
 - 2.2) Дифференциальный (разностный) метод, при нём измеряемая величина определяется по разности между искомой величиной и величиной, воспроизводимой меры.
 - 2.3) Нулевой метод частный случай дифференциального, когда разность доводят до нуля.
 - 2.4) Метод замещения измеряемую величину замещают равной ей по величине мерой.
 - 2.5) *Метод совпадений* значение измеряемой величины определяют по совпадению сигналов, отметок или других признаков, относящихся к измеряемой и известной величинам.

Метод замещения и нулевой метод требуют применения многозначной меры.

Указанная классификация методов измерения иллюстрируется на рис. 2.1.

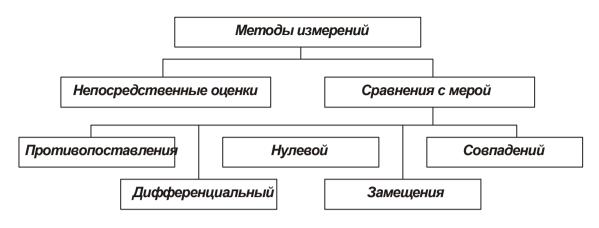


Рисунок 2.1

2.3. Основные характеристики измерений

Основными характеристиками измерений являются: результат и погрешность.

Результат измерений физической величины (кратко – результат измерения или, просто результат) – значение физической величины, полученное путем ее измерения.

Часто в полученный результат вносят поправки.

Поправка (англ. Correction) — значение физической величины, одноименной с измеряемой, которая вводится в результат измерения для исключения определенных, так называемых *систематических* составляющих погрешности (см. гл. 2), что находит отражение в терминологии:

- *неисправленный* результат измерения измеренное значение физической величины, полученное до внесения поправок;
- *исправленный* результат измерения измеренное значение физической величины и уточненное путем внесения в него необходимых поправок;

Погрешность средства измерения – разность между показаниями средства измерения и истинным значением измеряемой физической величины.

Качество измерений характеризуется точностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью, достоверностью, а также размером допускаемых погрешностей. *Качество измерений* — совокупность свойств, обусловливающих получение результатов с требуемыми точностными характеристиками, в необходимом виде и установленные сроки.

Точность результата измерений — одна из характеристик качества измерений, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения. Высокая точность измерения соответствует малым погрешностям. Количественно точность оценивают обратной величиной модуля относительной погрешности, например, если относительная погрешность составляет 0,01, то точность равна 100.

Правильность измерений – характеристика, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений.

Сходимость результатов измерений – близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом, в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

Воспроизводимость – близость результатов измерений одной и той же физической величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям (температура, давление, влажность и др.).

 $\begin{subarray}{ll} \begin{subarray}{ll} \begin$

$$P(\overline{X} - \Delta) \le A \le (\overline{X} + \Delta) = 1 - q = \alpha \tag{2.3}$$

находится истинное значение A оцениваемого параметра. B (2.3) параметр q – уровень значимости ошибки (см. гл. 2); (\overline{X} – Δ), (\overline{X} + Δ) – нижняя и верхняя границы доверительного интервала.

Контрольные вопросы

- 1. Что такое измерение, каковы признаки и слагаемые процесса измерения?
- 2. Как классифицируются измерения в зависимости от способа нахождения измеряемой величины?
- 3. Какова классификация методов измерений?
- 4. Какие существуют разновидности метода сравнения с мерой?
- 5. Каковы основные характеристики измерений?

Лекция 3 Система обеспечения единства измерений

3.1. Общие положения Государственной системы обеспечения единства измерений

При проведении измерений требуется обеспечить их единство, что необходимо для достижения сопоставимых результатов измерений одних и тех же параметров, выполненных в разное время и в различных местах, с помощью разных методов и средств.

Под **единством измерений** понимают состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и они обеспечиваются с помощью единообразных средств измерений (СИ), а погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Как таковое, понятие «единство измерений», очень емкое. Оно охватывает ряд важнейших задач практической метрологии: унификацию единиц физических величин, разработку систем воспроизведения величин и передачу их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью и т. д. Единство измерений должно обеспечиваться при любой точности измерений, необходимой в практической метрологии. На достижение и поддержание на должном уровне единства измерений направлена деятельность государственных и ведомственных метрологических служб, проводимая в соответствии с установленными правилами, требованиями, нормами и порядками.

Для обеспечения единства измерений реализуют следующие научно-технические, методические и административные мероприятия:

- 1. Использование законодательно установленной системы единиц физических величин, разрешенных для применения.
- 2. Разработка и применение эталонов единиц физических величин, воспроизводящих единицы в соответствии с их определением.
- **3.** Использование только аттестованных данных о физических константах и физикохимических свойствах материалов и веществ.
- 4. Государственные испытания при разработке, выпуске и импорте приборов.
- **5.** Периодическая поверка находящихся в обращении средств измерений. Изъятие из обращения неисправных приборов.

Руководит деятельностью метрологической службы Российской Федерации и ее координирует Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (в него 30 июня 2004 г. преобразован Госстандарт России). К субъектам метрологии относятся: Государственная метрологическая служба Российской Федерации (ГМС), Метрологические службы (МС) федеральных органов власти и юридических лиц и международные метрологические организации.

Общие требования и основные метрологические правила установлены законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений». Конкретные метрологические нормы и правила изложены и нормативных документах (стандартах, правилах, рекомендациях и пр.). Комплекс стан-

дартов и нормативных документов, обеспечивающий достижение и поддержание единства измерений, составляет государственную систему обеспечения единства измерений (ГСИ), технической основой которой является государственная эталонная база. Эталонная база Российской Федерации состоит из 1176 государственных первичных и специальных эталонов.

Для проверки соблюдения метрологических правил и норм ГМС осуществляет государственный метрологический контроль и надзор. Объектами государственного метрологического контроля и надзора являются: средства измерений, эталоны, методики выполнения измерений, качество товаров, другие объекты, предусмотренные правилами законодательной метрологии. Государственный метрологический контроль и надзор обеспечивает утверждение типа средств измерений, поверку средств измерений, лицензирование юридических и физических лиц, занимающихся изготовлением, ремонтом, продажей и прокатом средств измерений. ГМС осуществляет контроль и надзор за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками измерений, эталонами, соблюдением метрологических правил и норм.

Государственные органы управления Российской Федерации, а также юридические и физические лица, виновные в нарушении метрологических норм и правил, изложенных в законах РФ «О техническом регулировании» и «Об обеспечении единства измерений», несут уголовную, административную или гражданско-правовую ответственность в соответствии с действующим законодательством.

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все существующие средства измерений одной и той же физической величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения в специализированных учреждениях установочных единиц физических величин и передачи их размеров применяемым средствам измерений.

Воспроизведение единицы физической величины — совокупность операций по материализации единицы физической величины с наивысшей точностью посредством государственного эталона. Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы производят путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии определением единицы. Осуществляют такое воспроизведение с помощью национальных первичных эталонов. Например, единица массы — 1 килограмм (точно) воспроизведена в виде платиноиридиевой гири, хранимой в Международном бюро мер и весов в качестве международного эталона килограмма. Розданные другим странам эталоны имеют номинальное значение 1 кг.

Воспроизведение производной единицы — определение значения физической величины в указанных единицах на основании косвенных измерений других величин, функционально связанных с измеряемой. Так, воспроизведение единицы силы — Ньютона — осуществляется на основании известного уравнения механики F=mg, где m — масса тела; g — ускорение свободного падения.

Передача размера единицы – приведение размера единицы величины, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке или калибровке. Размер единицы передают «сверху вниз» – от более точных средств измерений к менее точным.

Хранение единицы — совокупность операций, обеспечивающая неизменность во времени размера единицы, присущего данному средству измерений. Хранение эталона единицы физической величины предполагает проведение взаимосвязанных операций, позволяющих поддерживать метрологические характеристики эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняются регулярные его исследования, включая сличения с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера.

Поверка — это операция, заключающаяся в установлении пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и контроля их соответствия предъявляемым требованиям. Основной метрологической характеристикой, определяемой при проверке СИ, является его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого СИ с более точным СИ — рабочим эталоном.

Поверочная схема – нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измерений с указанием методов и погрешности, и который утвержден в установленном порядке

Градуировка средств измерений – нанесение отметок на шкалу, соответственно показаниям образцового средства измерения

3.2 Эталоны единиц физических величин

Эталон – средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы физической величины с наивысшей точностью для данного уровня развития измерительной техники с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений.

Эталон должен обладать тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Неизменность — свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы физической величины в течение длительного интервала времени, при этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению.

Воспроизводимость — возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость – возможность сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерений. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результате сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличений.

Различают следующие виды эталонов:

первичный - обеспечивает воспроизведение и хранение единицы с наивысшей в стране точностью. Первичные эталоны — уникальные средства измерений, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники. Они составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений;

cneциальный — обеспечивает воспроизведение единицы в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью неосуществима и служит для этих условий первичным эталоном;

государственный – первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны. Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран.

вторичный эталон - хранит размер единицы, полученной путем сличения с первичным эталоном соответствующей физической величины.

По своему метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на следующие:

эталон-копия — предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Он создается в случае необходимости проведения большого числа поверочных работ с целью предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он не всегда является его физической копией;

эталон сравнения – применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом (например, международные сличения эталонов):

эталон-свидетель – предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. В настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель;

рабочий эталон – применяется для передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

Погрешности государственных первичных и специальных эталонов характеризуются неисключенной систематической погрешностью, случайной погрешностью и нестабильностью. Неисключенная систематическая погрешность описывается границами, в которых она находится. Случайная погрешность определяется средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений при воспроизведении единицы с указанием числа независимых измерений. Нестабильность эталона задается изменением размера единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, за определенный промежуток времени.

Оценки погрешностей вторичных эталонов характеризуются отклонением размеров хранимых ими единиц от размера единицы, воспроизводимой первичным эталоном.

Рабочие эталоны при необходимости подразделяют на 1-й, 2-й и последующие разряды, определяющие порядок их соподчинения в соответствии с поверочной схемой. При этом рабочие средства измерений 1-го разряда считаются *исходными* и подлежат поверке непосредственно по рабочим эталонам 1-го разряда. Рабочие средства измерений 2-го, 3-го и последующих разрядов являются *подчиненными* и подлежат поверке по рабочим эталонам 1-го, 2-го и последующих разрядов соответственно.

Различным видам измерений, исходя из требований практики и уровня точности измерений, устанавливают различное число разрядов рабочих эталонов, определяемых соответствующими стандартами на поверочные схемы для данного вида измерений.

На рис.3.1 показана метрологическая последовательность передачи размеров единиц физических величин от первичного эталона рабочим, от рабочих эталонов — рабочим мерам и измерительным приборам (рабочим средствам измерений).



Рисунок 3.1. Структура передачи размеров единиц физических величин

Рабочими называют средства измерений, которые применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Совокупность всех перечисленных эталонов образует эталонную базу Российской Федерации.

3.3 Стандартные образцы.

Для ряда областей измерений и в первую очередь для физико-химических измерений чрезвычайно перспективным средством повышения эффективности поверочных работ является применение стандартных образцов (СО). Правила работы с СО устанавливает ГОСТ 8.315-97 «ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения». Согласно этому документу, стандартный образец состава и свойств веществ и материалов — это СИ в виде вещества (материала), состав или свойства которого установлены аттестацией.

Стандартные образцы предназначены для обеспечения единства и требуемой точности измерений посредством:

- градуировки, метрологической аттестации и поверке СИ;
- метрологической аттестации методик выполнения измерений;
- контроля показателей точности измерения;
- измерения физических величин, характеризующих состав или свойства веществ и материалов, методами сравнения.

По своему назначению СО исполняют роль мер, однако в отличии от «классических» мер они имеют ряд особенностей. Например, образцы состава воспроизводят значения физических величин, характеризующих состав или свойства именно того материала (вещества), из которого они изготовлены. Однородность материала, из которого сделан образец, имеет принципиальное значение, в то время как для меры такая характеристика является второстепенной.

СО состава и свойств в отличии от мер характеризуются значительным влиянием неинформативных параметров (примесей, структуры материала и др.). При использовании СО очень часто необходимо учитывать функции влияния таких параметров.

В зависимости от вида аттестуемой характеристики различают:

- *стандартные образцы состава* воспроизводят значения величин, характеризующих содержание определенных компонентов;
- *стандартные образцы свойств* воспроизводят значения величин, характеризующих физические, химические, технические или другие свойства вещества, за исключением величин, характеризующих состав.

В зависимости от сферы действия и области применения определяется уровень утверждения СО. По этому признаку они делятся на государственные, отраслевые и стандартные образцы предприятий. Тем СО, которые включены в поверочные схемы, присваиваются разряды.

Стандартные образцы объединяются в типы. Tun — это классификационная группировка образцов, определяющими признаками которых является одно и то же вещество, из которого они изготовлены, и единая документация, по которой они выполнены. Для каждого типа СО при их аттестации устанавливается срок действия (не более 10 лет) и определяются метрологические характеристики, которые нормируются в документации на их разработку и выпуск. К ним относятся:

- аттестованное значение значение аттестованной характеристики образца, им воспроизводимое, установленное при его аттестации и приводимое в свидетельстве с указанием погрешности;
- погрешность аттестованного значения разность между аттестованным и истинным значениями величины, воспроизводимой той частью образца, которая используется при измерении;
- характеристика однородности характеристика свойства образца, выражающегося в постоянстве значения величины, воспроизводимой его различными частями, используемыми при измерениях;
- характеристика стабильности характеристика свойства образца сохранять значения метрологических характеристик в установленных пределах в течение указанного в свидетельстве срока годности при соблюдении заданных условий хранения и применения;
- функции влияния зависимость метрологических характеристик образца от изменения внешних влияющих величин в заданных условиях применения.

Применение СО должно осуществляться в соответствии с требованиями: нормативнотехнических документов на методы измерений, испытаний, контроля, поверки и градуировки СИ; аттестованных методик выполнения измерений; государственных, ведомственных и локальных поверочных схем.

3.4 Передача размеров единиц физических величин. Поверочные схемы.

Обеспечение правильной передачи размера единиц физических величин во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем. *Поверочная схема* — нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измерений с указанием методов и погрешности, и который утвержден в установленном порядке. Поверочные схемы делят на государственные, ведомственные и локальные.

Государственная поверочная схема распространяется на все имеющиеся средства измерений данной физической величины.

Ведомственная поверочная схема распространяется на средства измерений данной физической величины, подлежащие ведомственной поверке.

Локальная поверочная схема распространяется на средства измерений данной физической величины, подлежащие поверке в отдельном органе метрологической службы.

Государственную поверочную схему разрабатывают в виде национального стандарта, состоящего из ее чертежа и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу. Ведомственную и локальную поверочные схемы оформляют в виде чертежа. Ведомственные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам. Поверочная схема устанавливает передачу размера единиц одной или нескольких взаимосвязанных величин.

Чертежи поверочной схемы состоят из полей, расположенных друг под другом, и имеют наименования: «Эталоны», «Рабочие эталоны n-го разряда», «Рабочие средства измерений». Упрощенная структура чертежа поверочной схемы дана на рис.3. 2.

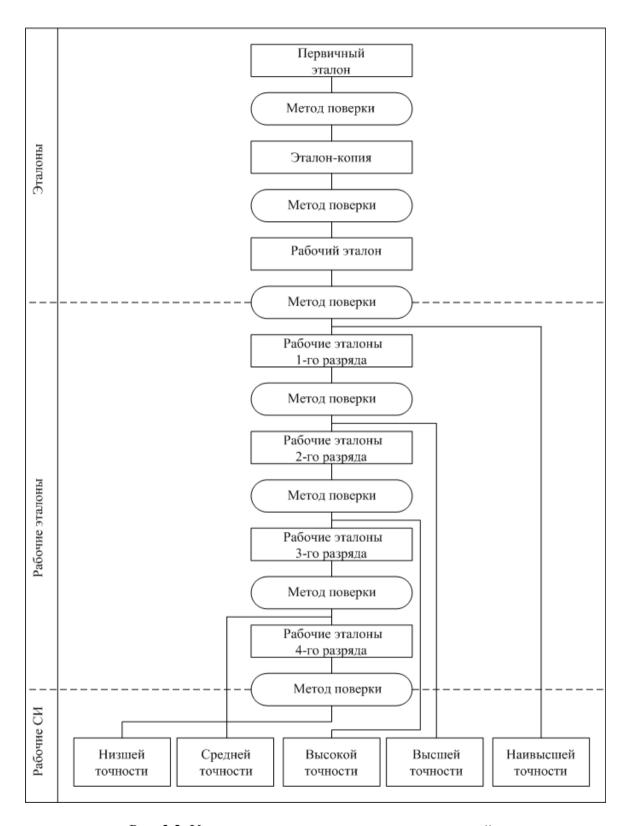


Рис. 3.2. Упрощенная структура чертежа поверочной схемы

На чертежах поверочной схемы должны быть указаны:

- наименования средств измерений и методов поверки;
- номинальные значения физических величин или их диапазоны;
- допускаемые значения погрешностей средств измерений;
- допускаемые значения погрешностей методов поверки

Методы поверки (градуировки) средств измерений (на рис. 2 обозначены как СИ) поверочной схемы делятся на прямые или косвенные, непосредственные, сличение при помощи средств сравне-

ния (например, компаратора). Наименования СИ заключают в прямоугольники, а методов поверки — в горизонтальные овалы; передачу размеров единиц «сверху вниз» изображают сплошными линиями, соединяющими объекты поверки с соответствующими средствами, откуда передается размер единицы.

3.5 Способы поверки средств измерений.

Одной из главных форм государственного метрологического надзора и ведомственного контроля, направленных на обеспечение единства измерений в стране, как указывалось ранее, является поверка СИ. Основной метрологической характеристикой, определяемой при проверке СИ, является его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого СИ с более точным СИ – рабочим эталоном.

Поверке подвергаются СИ, выпускаемые из производства и ремонта, получаемые из-за рубежа, а также находящиеся в эксплуатации и хранении, при проведении инспекции или экспертизы. Различают поверки: государственную и ведомственную, периодическую и независимую, внеочередную и инспекционную, комплексную, поэлементную и др.

Основные требования к организации и порядку проведения поверки СИ установлены ГОСТ "ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения". Термин "поверка" введен ГОСТ "ГСИ. Метрология. Термины и определения" как "определение метрологическим органом погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению". В отдельных случаях при поверке вместо определения значений погрешностей проверяют, находится ли погрешность в допустимых пределах. Таким образом, поверку СИ проводят для установления их пригодности к применению. Пригодным к применению в течение определенного межповерочного интервала времени признают те СИ, поверка которых подтверждает их соответствие метрологическим и техническим требованиям к данному СИ. Средства измерений подвергают первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и экспертной поверкам.

Первичной поверке подвергаются СИ при выпуске из производства или ремонта, а также СИ, поступающие по импорту.

Периодической поверке подлежат СИ, находящиеся в эксплуатации или на хранении через определенные межповерочные интервалы, установленные с расчетом обеспечения пригодности к применению СИ на период между поверками.

Инспекционную поверку производят для выявления пригодности к применению СИ при осуществлении госнадзора и ведомственного метрологического контроля за состоянием и применением СИ.

Экспертную поверку выполняют при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам (МХ), исправности СИ и пригодности их к применению.

Метрологическая аттестация — это комплекс мероприятий по исследованию метрологических характеристик и свойств средства измерения с целью принятия решения о пригодности его применения в качестве образцового. Обычно для метрологической аттестации составляют специальную программу работ, основными этапами которых являются: экспериментальное определение метрологических характеристик; анализ причин отказов; установление межповерочного интервала и др. Метрологическую аттестацию средств измерений, применяемых в качестве образцовых, производят перед вводом в эксплуатацию, после ремонта и при необходимости изменения разряда образцового средства измерений. Результаты метрологической аттестации оформляют соответствующими документами (протоколами, свидетельствами, извещениями о непригодности средства измерений).

Основные требования к организации и порядку проведения поверки средств измерений приведены в правилах по метрологии и ряде различных рекомендаций. Поверку выполняют метрологические службы, на которые возложены данные обязанности. Средству измерения, признанному годным к практическому применению, выдается свидетельство о поверке путем нанесения поверительного клейма или иными способами, установленными соответствующими нормативными документами.

Меры поверяются следующими методами:

- измерением воспроизводимой мерой величины приборами нужного класса точности; при этом поверку часто называют градуировкой;
- сличением с более точной мерой посредством компаратора: сличение меры с помощью компаратора методами противопоставления или замещения общим для этих методов поверки средств измерения является выработка сигнала о наличии разности размеров сравниваемых величин; если подбором образцовой меры сигнал будет сведен к нулю, то реализуется нулевой метод измерения;
- калибровкой, когда с более точной мерой сличается лишь одна мера набора или одна из отметок шкалы многозначной меры, а действительные размеры других мер определяются их взаимным сравнением в различных сочетаниях на приборах сравнения.

Поверка измерительных приборов проводится путем:

- непосредственного сличения показаний поверяемого и образцового прибора при измерении одной и той же физической величины; основой данного метода служит одновременное измерение одного и того же значения величины поверяемым и образцовым средствами измерений; разность их показаний равна абсолютной погрешности поверяемого средства измерений;
- непосредственного сравнения измеряемой величины и величины, воспроизводимой образцовой мерой требуемого класса точности; значения величины на выходе меры выбирают равными цифровым меткам шкалы прибора; наибольшая разность между результатами измерения и соответствующими им размерами мер является в этом случае основной погрешностью прибора.

Средства измерений, состоящие из нескольких частей (элементов), можно поверять *поэлементно* или *комплектно*. При *поэлементной* поверке погрешности средства измерений определяют по погрешности составных частей. Этот вид поверки является расчетно-экспериментальным и, как правило, применяется для сложных приборов, для которых отсутствуют образцовые средства измерений, позволяющие определять погрешность во всем диапазоне измерений. Например, поэлементная поверка практикуется для различных измерительных магазинов, измерительных линий, информационных измерительных систем и т. д. При *комплектной* поверке определяют погрешности средства измерений в целом для всего измерительного прибора или измерительной системы. Этот вид поверки является более информативным и достоверным. Его целесообразно применять для средств измерений, в которых влияние взаимодействия составных компонентов на метрологические характеристики трудно оценить заранее.

При проведении поверки определяют объем поверочных работ.

Под *объемом поверочных работ* понимают совокупное число основных поверочных операций (без подготовительных), в результате выполнения которых можно сделать вывод о пригодности прибора к применению.

Объем поверки зависит от числа поверяемых метрологических характеристик; числа поверяемых отметок в диапазоне измерений; числа измерений в каждой поверяемой отметке. Первое число определяется числом измерительных функций прибора; второе — характером измерения поверяемой метрологической характеристики; третье — возможным разбросом случайной составляющей погрешности прибора.

Нормативные документы на разработку методик по поверке средств измерений требуют определять минимум поверяемых метрологических характеристик, достаточный для решения вопроса о пригодности поверяемых средств измерений к применению.

Анализ существующих подходов к определению состава поверяемых параметров показал, что наиболее распространены способы, основанные на обеспечении апостериорной надежности контролируемых технических систем. Однако при этом трудно определять характеристики надежности анализируемых параметров на этапе разработки средства измерений. Поэтому объем операций при первичной поверке, как правило, больше, чем при периодической поверке прибора.

Установленные научно-технической документацией (НТД) объемы поверочных работ являются, как правило, значительными, требуют больших трудозатрат и длительного изъятия средств из-

мерений из обращения, что влияет на снижение готовности устройств к применению, а следовательно, и на их эффективность.

Поверка средств измерений в полном объеме, установленном НТД, в ряде случаев становится неоправданной. Так, из опыта эксплуатации конкретных средств измерений известно, что значительное число их не используется на всех диапазонах и пределах измерений и не все нормируемые метрологические характеристики необходимы при оценке точности выполняемых измерений. Это обусловлено некоторыми объективными причинами. Например, большинство радиоизмерительных приборов являются многофункциональными, а электроизмерительные приборы класса точности 0.5 и выше – многопредельными.

Положительный эффект от введения поверки средств измерений по сокращенной программе выражается в следующем:

- снижаются трудозатраты на поверочные работы и время изъятия средств измерений из сферы применения их по назначению; исключаются случаи браковки средств измерений на тех диапазонах и пределах измерений, а также по тем метрологическим характеристикам, которые практически не используются;
- повышаются характеристики надежности за счет снижения случаев браковки средств измерений из-за неисправности комплектующих элементов и отдельных блоков, не участвующих в работе средств измерений на ограниченных диапазонах;
- появляются возможности увеличения межповерочных интервалов;
- уменьшаются время восстановления и номенклатура требуемого для восстановления ЗИП (запасные части, инструменты и материалы);
- обеспечиваются возможность поверки средств измерений без демонтажа с технических устройств и автоматизация выполнения поверочных работ.

Недостатком поверки средств измерений по сокращенной программе является невозможность использования данных средств измерений на диапазонах, пределах измерений и с теми метрологическими характеристиками, поверка которых была исключена. Поверка средств измерений по сокращенной программе не должна нарушать единства и требуемой точности измерений. Соблюдение этих условий обусловливает требование к методу определения сокращенной программы поверки средств измерений.

Программу сокращенной поверки следует составлять так, чтобы исходя из конкретных условий применения средств измерений объем поверки был минимальным и за межповерочный интервал обеспечивалась погрешность измерений, определяемая нормируемыми значениями соответствующих метрологических характеристик. Введение программы сокращенной поверки не должно приводить к созданию новой или дополнительной НТД на поверку средств измерений.

Исходя из специфики методов разработки программ сокращенной поверки целесообразно разделить средства измерений на широкодиапазонные, многопредельные и многоцелевые (комбинированные). К широкодиапазонным следует относить средства измерений, у которых область значений измеряемой (воспроизводимой) величины расширена, вид измеряемой или воспроизводимой физической величины (напряжение, ток, мощность и др.) фиксирован, а параметры данной физической величины (частотный диапазон и др.) имеют расширенную область значений. К многопредельным относят средства, позволяющие измерять одноименные физические величины на двух и более пределах; к многоцелевым (комбинированным) – средства, предназначенные для измерения ряда физических величин.

Как показал опыт поверки средств измерений по сокращенной программе, техникоэкономический эффект от ее введения становится значительным и такая поверка целесообразна тогда, когда при эксплуатации широкодиапазонных средств измерений используется менее 3/4 рабочего диапазона измерений; при эксплуатации многопредельных средств измерений не используется хотя бы один предел; при эксплуатации многоцелевых средств измерений не используется измерение хотя бы одной из физических величин.

Контрольные вопросы

- 1. Какие мероприятия используются для обеспечения единства измерений?
- 2. Что означают понятия: воспроизведение единицы физической величины; передача размера единиц и хранение единиц?
- 3. Что такое эталон и каковы его основные свойства?
- 4. Какие виды эталонов составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений?
- 5. Как классифицируются вторичные эталоны по метрологическому назначению?
- 6. Каково назначение, виды и типы стандартных образцов?
- 7. Что такое поверочная схема, их разновидности?
- 8. Каким видам поверок подвергаются средства измерений?
- 9. Какими методами поверяются меры и измерительные приборы?

РАЗДЕЛ II. ПОГРЕШНОСТИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Лекция 4. Классификация и методы учета погрешностей

4.1 Классификация погрешностей

При любом измерении неизбежны обусловленные различными причинами отклонения результатов измерений от истинного значения измеряемой величины. Истинное значение является объективной оценкой объекта. Результаты измерения представляют собой приближённые оценки значений величин, найденные путём измерения. Они зависят от метода измерения, от средств измерений, от оператора.

Погрешностью называется отклонение результата измерений от истинного значения измеряемой величины. Классификация погрешностей осуществляется по различным признакам.

- 1. В зависимости от условий применения средств измерения (СИ) погрешности делят на:
 - 1) **основную** составляющая погрешности измерения, которой обладает СИ в нормальных условиях эксплуатации;
 - 2) дополнительную погрешность СИ при отклонении условий измерений от нормальных.
- 2. В зависимости от слагаемых процесса измерения:
 - 1) погрешность меры;
 - 2) погрешность преобразования;
 - 3) погрешность сравнения измеряемой величины с мерой;
 - 4) погрешность фиксации результатов измерения.
- 3. В зависимости от характера проявления погрешности делят на:
 - 1) **систематические погрешности** составляющие погрешности, которые при повторных измерениях одной и той же физической величины остаются постоянными, или изменяются по определённому закону;
 - 2) **случайные погрешности** составляющие погрешности, которые при повторных измерениях одной и той же физической величины изменяются случайным образом;
 - 3) **грубые погрешности** составляющие погрешности, которые существенно превышают ожидаемые.
- 4. В зависимости от причины возникновения:
 - 1) аппаратурная (инструментальная) погрешность, возникающая из-за несовершенства средства измерений, т.е. от погрешностей средств измерений.
 - 2) внешние погрешности, зависящие от условий проведения измерений, т.е. от отклонения влияющих величин от нормальных значений.
 - 3) **методическая погрешность**, обусловленная несовершенством выбранного метода измерений или неполным знанием особенностей изучаемых явлений:
 - 4) **субъективные погрешности**, обусловленные индивидуальными особенностями экспериментатора.
- 5. В зависимости от способа количественного выражения:
 - 1) абсолютная погрешность

$$\Delta x = x - x_0 \tag{4.1}$$

где x – результат измерения, x_0 – истинное значение измеряемой величины;

2) относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_0} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \tag{4.2}$$

На практике вместо истинного значения измеряемой величины используют действительное значение, определяемое экспериментальным путём и максимально приближённое к истинному значению.

3) Приведённая погрешность

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100\% \tag{4.3}$$

где x_N -нормированный множитель, равный длине шкалы.

$$X_N = X_k - X_{k0}$$
 (4.4)

где $x_{k\,0}$ и x_k – начальное и конечное значения на шкале прибора соответственно.

4.2 Случайная погрешность

Наличие случайных погрешностей в результате при повторении измерений в неизменных условиях эксперимента объясняется самой природой этих погрешностей. Строго говоря, условия не остаются неизменными и их колебания вызывают непостоянство результата, т.е. случайные погрешности всегда будут присутствовать в результате измерений.

Характером проявления случайной погрешности определяется и способ их учета. Учесть влияние случайных погрешностей на результат измерения можно только путем анализа всей совокупности случайных погрешностей.

Случайная погрешность считается случайной величиной, и поэтому ее оценивают методами математической статистики и теории вероятности. Наиболее полной характеристикой случайной погрешности является закон распределения, представляющий собой зависимость вероятности появления случайной погрешности от величины этой погрешности. Большинство результатов измерений содержит случайную погрешность, подчиняющуюся нормальному закону распределения:

$$W(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \qquad (4.5)$$

где $W(\Delta)$ — плотность вероятности случайной погрешности отдельного измерения $\Delta_i = x_i - \bar{x}$, это отклонение может быть вычислено для каждого измерения. Следует помнить, что сумма отклонений результата измерений от среднего значения равна нулю, а сумма их квадратов минимальна. Эти свойства используются при обработке результатов измерений для контроля правильности вычислений;

 σ — параметр, характеризующий степень случайного разброса результатов отдельных измерений относительно истинного значения X_0 , называют средним квадратическим отклонением случайной величины измерения;

 \overline{X} - математическое ожидание результатов наблюдений.

 \overline{X} , σ – являются точечными оценками случайной погрешности.

При случайных погрешностях результат каждого измерения X_i будет отличаться от истинного значения X_0 измеряемой величины:

$$X_i - X_0 = \Delta \tag{4.6}$$

Эту разность называют случайной погрешностью отдельного измерения (результата наблюдения).

Истинное значение X_0 неизвестно, поэтому на практике его заменяют наиболее достоверным значением измеряемой величины, определяемым на основании экспериментальных данных.

Если проводить серию измерений исследуемой величины и определить среднее арифметическое значение, то оно является наиболее достоверным значением измеряемой величины. При вычислении среднего арифметического большого числа измерений погрешности отдельных измерений, имеющие разный знак, взаимно компенсируются.

$$\overline{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \ldots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$
(4.7)

где п – число измерений.

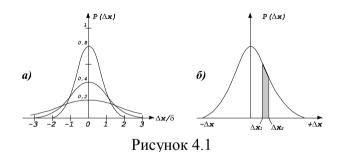
$$\sigma \cong S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}}$$
(4.8)

где x_i — численный результат отдельного измерения:

n – число измерений.

Характер кривых, описываемых (4.5), показан на рисунке 4.1а для трёх значений σ . Функция (4.5) графически изображается колоколообразной кривой, симметричной относительно ординат, асимптотически приближающейся к оси абсцисс. Максимум этой кривой получается в точке Δ =0, а величина этого максимума $W(\Delta) = 1/\sigma\sqrt{2\pi}$. Как видно из рисунка 4.1, чем меньше σ , тем уже кривая и, следовательно, реже встречаются большие отклонения, т.е. тем точнее выполняются измерения.

Вероятность появления погрешности в пределах между Δ_1 и Δ_2 определяется площадью заштрихованного участка на рис. 4.1 δ , т.е. определённым интегралом от функции $W(\Delta)$:



$$p(\Delta_1 \le \Delta \le \Delta_2) = \int_{\Delta x_1}^{\Delta x_2} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta}{\sigma}\right)^2} d(\Delta)$$
 (4.9)

Значения интеграла вычислены для различных пределов и сведены в таблицы. Интеграл, вычисленный для пределов $\Delta 1 = -\infty$ и $\Delta 2 = +\infty$, равен единице, т. е. вероятность появления случайной погрешности в интервале от $-\infty$ до $+\infty$ равна единице.

Из таблиц, приведенных в математических справочниках, следует что:

$$P(-\sigma \le \Delta \le \sigma) = 0,683;$$

$$P(-3\sigma \le \Delta \le 3\sigma) = 0,9973$$
(4.10)

Таким образом, с вероятностью 0,683 случайные погрешности измерения не выходят за пределы $\pm \sigma$. С вероятностью 0,997 случайная погрешность находится в пределах $\pm 3\sigma$, т.е. только 3 измерения из 1000 могут дать погрешность, превышающую $\pm 3\sigma$. Это соотношение называется законом трёх сигм.

Так как на практике число измерений не превышает нескольких десятков, то появление погрешности равной $\pm 3\sigma$, маловероятно. Поэтому погрешность $\pm 3\sigma$ считается максимально возможной случайной погрешностью. Погрешности более $\pm 3\sigma$ считаются промахами и при обработке результатов измерений не учитываются.

В теории случайных погрешностей вводится также понятие о среднем квадратическом отклонении среднего арифметического $\sigma_{\bar{x}}$ (средняя квадратическая погрешность результата измерений)

$$\sigma_{\bar{x}} = S_{\bar{x}} = \pm \frac{S}{\sqrt{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$
(4.11)

где $S_{\bar{x}}$ - оценка средней квадратической погрешности $\sigma_{\bar{x}}$ ряда из n измерений.

Рассмотренные оценки результатов измерений \overline{X} , σ , выражаемые одним числом, называют **точечными оценками**. Поскольку подобную оценку обычно принимают за действительное значение измеряемой величины, то возникает вопрос о точности и надежности полученной оценки. Судят об этом по вероятности α того, что результат измерений (действительное значение) отличается от истинного не более чем на Δ .

Это можно записать в виде

$$P\{(\overline{X} - \Delta) < A < (\overline{X} + \Delta)\} = \alpha \tag{4.12}$$

Вероятность α называется доверительной вероятностью или коэффициентом надежности, а интервал значений от $\overline{X}-\Delta$ до $\overline{X}+\Delta$ — доверительным интервалом. Обычно его выражают в долях средней квадратической погрешности

$$\Delta = \pm t_a(n) \cdot \sigma_{\bar{x}} \tag{4.13}$$

где $t_{\alpha}(n)$ - табулированный коэффициент распределения Стъюдента, который зависит от доверительной вероятности α и числа измерений n, значения которого можно найти в математических справочниках.

Доверительную вероятность и доверительный интервал называют интервальными оценками.

4.3. Методы обнаружения и исключения систематических погрешностей

Для учёта и устранения систематических погрешностей применяют методы, которые условно можно разбить на две группы: теоретические и экспериментальные способы.

- 1. Теоретические способы возможны, когда может быть получено аналитическое выражение для искомой погрешности на основании априорной информации.
- 2. Экспериментальные способы также предполагают наличие априорной информации, но лишь качественного характера. Для получения количественной оценки необходимо проведение дополнительных исследований.

Для устранения систематических погрешностей применяются следующие методы:

- 1. Постоянные систематические погрешности.
 - а) Метод замещения осуществляется путем замены измеряемой величины известной величиной так, чтобы в состоянии и действии средства измерений не происходило изменений;
 - б) Метод противопоставления.

Измерения выполняются с двумя наблюдениями, проводимыми так, чтобы причина постоянной погрешности оказывала разные, но известные по закономерности воздействия на результаты наблюдений.

- в) Метод компенсации погрешности по знаку.
 - Измерения также проводятся дважды так, чтобы постоянная систематическая погрешность входила в результат измерения с разными знаками. За результат измерения принимается среднее значение двух измерений.
- 2. Прогрессирующие систематические погрешности.
 - а) Метод симметричных наблюдений.

Измерения производят с несколькими наблюдениями, проводимыми через равные интервалы времени, затем обрабатывают результаты, вычисляют среднее арифметическое симметрично расположенных наблюдений. Теоретически эти средние значения должны быть равны. Эти данные позволяют контролировать ход эксперимента, а также устранять систематические погрешности.

б) Метод рандомизации.

Этот метод основан на переводе систематических погрешностей в случайные. При этом измерение некоторой физической величины проводят рядом однотипных приборов с дальнейшей статистической обработкой полученных результатов. Уменьшение систематической погрешности достигается и при изменении случайным образом методики и условий проведения измерений. При определёнии значений систематической погрешности, результаты измерений исправляют, то есть вносят либо поправку, или поправочный множитель, но исправленные результаты обязательно содержат не исключенные остатки систематических погрешностей (НСП)

4.4. Методы обнаружения и исключения грубых погрешностей

При измерении физической величины может появиться результат наблюдения $x_{\rm B}$, резко отличающийся от остальных, который называют анормальным. При этом необходимо проверить, не является ли он промахом, который следует исключить.

При обнаружении грубых погрешностей ставится вопрос об учёте или отбрасывании анормального результата наблюдения. Решение этой задачи осуществляется статистическими методами теории вероятности и зависит от проведенного числа измерений.

Если проведено большое число измерений (n≥30), то пользуются критерием грубых погрешностей.

$$|x_B - \overline{x}| > 3\sigma$$
 - такой результат отбрасывают.

При малом числе измерений (n < 30) пользуются критерием, рекомендуемым положениями ГОСТ 8.207 - 76. Для исключения грубых погрешностей из результатов измерений по этому критерию проводят следующие операции.

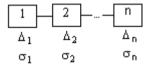
1. Результаты группы из n наблюдений упорядочивают по возрастанию и по формулам (4.7) и (4.8) вычисляют оценки среднего арифметического х и среднеквадратического отклонения наблюдений σ данной выборки. Для анормального результата рассчитывается коэффициент

$$t = \frac{\left|x_B - \overline{x}\right|}{\sigma} \tag{4.14}$$

- 3. Выполняют сравнение коэффициентов t_{rp} и t: если $t > t_{rp}$ анормальный результат относят к промахам и исключают; если $t < t_{rp}$ анормальный результат учитывают при обработке результатов наблюдений.

4. 5 Суммирование систематических и случайных погрешностей

Погрешность сложных измерительных приборов зависит от погрешностей отдельных его блоков. Суммирование погрешностей производится по определенным правилам. В общем случае измерительный прибор состоит из n блоков, каждый из которых обладает как систематической Δ_i , так и случайной среднеквадратической σ_i погрешностями.



1. Суммирование систематических погрешностей производится по алгебраическому закону с учётом знаков

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n} \Delta_i$$

2. Суммирование случайных погрешностей производится по квадратическому закону с учётом коэффициента корреляции. На практике обычно пользуются двумя крайними случаями, когда корреляция отсутствует, т. е. к= 0, тогда

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_1)^2 + 2 \cdot (\sigma_1 \cdot \sigma_2) + (\sigma_2)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i)^2}$$
(4.15)

к=1 - жёсткая корреляция.

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} \sigma_{i}\right)^{2}} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{i}$$
(4.16)

3. Результирующая погрешность определяется квадратическим суммированием систематической и случайной погрешностей с учётом коэффициента корреляции.

При суммировании погрешностей используют критерий ничтожной погрешности: если частная погрешность меньше 0,3 общей погрешности, то этой частной погрешностью можно пренебречь.

4.6. Погрешности косвенных измерений

Погрешность косвенных измерений находится в соответствии с теоремой: пусть физическая величина Z, значение которой определяют косвенным путём, представляет собой нелинейную дифференцируемую функцию Z=f(x_1,x_2...x_q) и $\overline{X}_1,\overline{X}_2,...$ \overline{X}_q - независимые результаты прямых измерений значений аргументов $X_1, X_2, ..., X_q$, полученные с абсолютными среднеквадратическими случайными погрешностями $\sigma_1, \sigma_2, ..., \sigma_q$, и содержащие соответственно абсолютные систематические погрешности $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$

Тогда результат косвенного измерения, определяемый из выражения

$$A = f(X_1, X_2, ..., X_q)$$

содержит абсолютную систематическую погрешность, определяемую соотношением:

$$\Delta = \left(\frac{d}{dx_1}Z\right) \cdot \Delta_1 + \left(\frac{d}{dx_2}Z\right) \cdot \Delta_2 + \dots + \left(\frac{d}{dx_n}Z\right) \cdot \Delta_n \tag{4.17}$$

относительную систематическую погрешность:

$$\delta_{c} = \frac{\Delta}{A} = \left(\frac{d}{dx_{1}}Z\right) \cdot \frac{\Delta_{1}}{A} + ... + \left(\frac{d}{dx_{n}}Z\right) \cdot \frac{\Delta_{n}}{A} \tag{4.18}$$

абсолютную случайную среднеквадратическую погрешность:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{d}{dx_1}Z\right)^2 \cdot \left(\sigma_1\right)^2 + \left(\frac{d}{dx_2}Z\right) \cdot \left(\sigma_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{d}{dx_n}Z\right) \cdot \left(\sigma_n\right)^2},\tag{4.19}$$

относительную случайную погрешность:
$$\delta_{\text{сп}} = \frac{\sigma}{A} = \sqrt{\left(\frac{d}{dx_1}Z\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_1}{A}\right)^2 + \left(\frac{d}{dx_2}Z\right) \cdot \left(\frac{\sigma_2}{A}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{d}{dx_n}Z\right) \cdot \left(\frac{\sigma_n}{A}\right)^2}. \tag{4.20}$$

При оценке погрешности косвенных измерений необходимо пользоваться критерием ничтожных погрешностей.

Если частная погрешность составляет менее 30% от результирующей - её отбрасывают (на практике используют даже 40%).

Контрольные вопросы

- 1. Что называется погрешностью измерений?
- 2. Как классифицируются погрешности:
 - в зависимости от условий применения средств измерений;
 - в зависимости от характера проявления погрешности;
 - в зависимости от источника возникновения;
 - в зависимости от способа математического выражения?
- 3. Как определяются точечные и интервальные оценки случайной погрешности?
- 4. Каковы методы обнаружения и исключения:
 - систематических погрешностей;
 - грубых погрешностей?
- 5. Каким образом производится суммирование систематических и случайных погрешностей?
- 6. Как вычисляются погрешности косвенных измерений?

Лекция 5. Обработка результатов измерений

5.1. Алгоритм обработки результатов измерений.

Статистическая обработка результатов измерений включает в себя следующие операции:

- 1. исключение известных систематических погрешностей из результатов наблюдений;
- 2. проверка гипотезы о принадлежности результатов наблюдений нормальному закону распределения;
- 3. обнаружение и исключение грубых погрешностей;
- 4. вычисление истинного значения измеряемой величины;
- 5. вычисление погрешности результата измерений:
 - а) оценка среднеквадратического отклонения результатов наблюдений, результата измерений;
 - б) вычисление доверительного интервала случайной погрешности результата измерений;
 - в) вычисление границ неисключенной систематической погрешности результата измерений;
 - г) запись результата измерений в стандартной форме.

5.2. Статистическая обработка прямых равноточных многократных измерений.

Равноточными называются измерения, проводимые в одинаковых условиях одним оператором с помощью одних и тех же средств измерений.

При однократных измерениях оценку погрешности производят на основе класса точности используемых средств измерений.

Получаемый при этом предел допускаемой погрешности СИ неполно характеризует качество измерений, т. е. остается неизвестным закон распределения вероятностей погрешностей и не ясно, $^{\circ}$

какая из составляющих систематическая Δ с или случайная $\overset{\circ}{\Delta}$ доминируют в сумме

$$\Delta = \Delta c + \stackrel{\circ}{\Delta} \tag{5.1}$$

Для того, чтобы оценить случайную погрешность и определить более точно усредненный результат измерения проводят многократные наблюдения и статистическую обработку их.

Структура погрешности в каждой точке шкалы СИ полностью характеризуется плотностью распределения вероятностей. Определение оценки плотности распределения вероятностей (гистограммы) требует проведения нескольких сотен измерений.

Результаты наблюдений, являющихся случайными величинами X, распределены по нормальному закону (закону Гаусса), если их плотность вероятностей соответствует (4.7).

Для решения многих задач не требуется знания функции и плотности распределения вероятностей, а вполне достаточными характеристиками случайных погрешностей служат их простейшие числовые характеристики: математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение. Числовые вероятностные характеристики погрешностей, представляющие собой неслучайные величины, теоретически определяются при конечном числе опытов. Практически число опытов всегда ограничено, поэтому реально пользуются числовыми характеристиками, которые принимают за искомые вероятностные характеристики и называют оценками характеристик. Определение оценок числовых характеристик может быть выполнено по значительно меньшему числу наблюдений (порядка 10-20).

Пусть при измерении величины A n раз получен ряд значений x_1 , x_2 , x_3 , ... x_n . Если число измерений n достаточно велико, то за истинное значение измеряемой величины принимают наиболее достоверное значение - среднее арифметическое (действительное)

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{N} x_i$$
 (5.2)

Зная среднее арифметическое значение, можно определить отклонение результата единичного измерения от среднего значения

$$\Delta_i = x_i - \bar{x} \tag{5.3}$$

Это отклонение может быть вычислено для каждого измерения. Следует помнить, что сумма отклонения результата измерений от среднего значения равна нулю, а сумма их квадратов минимальна. Эти свойства используются при обработке результатов измерений для контроля правильности вычислений.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешности однократного измерения σ равно

$$\sigma \cong S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}}$$
(5.4)

В теории случайных погрешностей вводится также понятие о среднем квадратическом отклонении среднего арифметического $\sigma_{\bar{x}}$ (средняя квадратическая погрешность результата измерений)

$$\sigma_{\bar{x}} = S_{\bar{x}} = \pm \frac{S}{\sqrt{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$
 (5.5)

где $S_{\overline{x}}$ - оценка средней квадратической погрешности $\sigma_{\overline{x}}$ ряда из n измерений.

При оценке результатов измерений пользуются понятием предельно допустимой (максимальной) погрешности ряда измерений

$$\Delta_{\text{MAKC}} = 3 \, \sigma \tag{5.6}$$

Рассмотренные оценки результатов измерений, выражаемые одним числом, называют точечными оценками. Поскольку подобную оценку обычно принимают за действительное значение измеряемой величины, то возникает вопрос о точности и надежности полученной оценки. Судят об этом по вероятности α того, что результат измерений (действительное значение) отличается от истинного не более, чем на Δ . Это можно записать в виде

$$P\{(\bar{x} - \Delta) < A < (\bar{x} + \Delta)\} = \alpha \tag{5.7}$$

Вероятность α называется доверительной вероятностью или коэффициентом надежности, а интервал значений от \bar{x} - Δ до \bar{x} + Δ — доверительным интервалом. Обычно его выражают в долях средней квадратической погрешности

$$\Delta = \pm t_a(n) \cdot \sigma_{\bar{x}} \tag{5.8}$$

где $t_{\alpha}(n)$ - табулированный коэффициент распределения Стьюдента, который зависит от доверительной вероятности α и числа измерений n.

Результат прямых равноточных многократных измерений записывается в виде

$$A = \bar{x} \pm \Delta; \alpha \tag{5.9}$$

Контрольные вопросы

- 1. Какие операции включает в себя статистическая обработка результатов измерений?
- 2. Какие операции включает в себя статистическая обработка прямых равноточных измерений?
- 3. Какая величина принимается за истинное значение измеряемой величины?
- 4. Что такое доверительная вероятность и доверительный интервал, какие свойства измерений они характеризуют?
- 5. Какова форма записи результата многократных измерений?

РАЗДЕЛ ІІІ. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ.

Лекция 6. Основы построения средств измерений

6.1 Классификация средств измерений

Средства измерений – технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики.

1. По назначению средства измерения подразделяют на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы и вспомогательные средства. Совокупность различных средств измерений может образовывать измерительные установки и измерительные системы.

Мера – средство измерения, предназначенное для воспроизведения и хранения единиц физической величины.

Измерительный преобразователь – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для преобразования, передачи, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительный прибор — средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного считывания.

Вспомогательные средства измерений — средства измерения величин, влияющих на метрологические свойства других средств измерений.

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для восприятия наблюдателем и расположенной в одном месте.

Измерительные системы — совокупность средств измерений, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки и использования в АСУ.

2. В зависимости от точности средства измерения делят на эталоны, образцовые средства измерения и рабочие средства измерения.

Эталоном называется средство измерения, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерения и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона.

Образцовые средства измерения — средства измерения, служащие для поверки по ним других средств измерения, и утвержденные в качестве образцовых.

Рабочие средства измерения — средства измерения, применяемые для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

6.2 Нормирование погрешностей средств измерений. Классы точности

Основные погрешности средств измерения нормируются путем задания пределов допускаемой основной погрешности, при которой средство измерения (СИ) по техническим требованиям может быть допущено к применению.

Для того чтобы оценить погрешность, которую внесет данное СИ в конечный результат, пользуются предельными значениями погрешности для данного типа СИ.

Предел допускаемой основной абсолютной погрешности Δ может быть представлен одним из трех способов:

- постоянным для любых значений X числом, характеризующим аддитивную погрешность,

$$\Delta = \pm a; \tag{6.1}$$

- в виде двухчленной формулы, включающей аддитивную и мультипликативную погрешности,

$$\Delta = \pm (a + bx); \tag{6.2}$$

- в виде уравнения

$$\Delta = f(x) \tag{6.3}$$

При сложной зависимости (6.3) допускается представлять погрешность в виде графика и таблицы. Пределы допускаемой относительной погрешности для случая (6.1) в процентах выражают формулой

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X} \cdot 100\% = \pm \frac{b}{X} \cdot 100\% = \pm q \tag{6.4}$$

для случая (6.2) – формулой

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_{\kappa}}{X} \right| \right) - 1 \right]$$

где X_{κ} – предел измерений;

 $c = b + \frac{a}{X_{\kappa}}$ - имеет смысл приведенной погрешности в конце диапазона измерений (при $X = X_{\kappa}$);

 $d = \frac{a}{X_{\kappa}}$ - имеет смысл приведенной погрешности в начале диапазона измерений (при X = 0), причем c > d.

Предел допускаемой приведенной погрешности в процентах выражается формулой

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_n} \cdot 100\% = \pm p \tag{6.5}$$

где p — отвлеченное положительное число.

Согласно ГОСТ 8.401-80 для указания нормированных пределов допускаемых погрешностей значения \mathbf{p} , \mathbf{q} , \mathbf{c} , \mathbf{d} выражаются в процентах и выбираются из ряда чисел: (1;1,5;2;2,5;3;4;5 и 6) $\times 10^{\rm n}$, где n =+1;0;-1;-2;-3 и т.д.

В настоящее время в эксплуатации большое число средств измерений, метрологические характеристики которых нормируются на основе классов точности.

Класс точности — обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допустимых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значение которых устанавливают в соответствующих стандартах.

Класс точности позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность средст измерений одного типа, но не характеризует точности измерений, выполняемых такими средствами, так как погрешность зависит и от метода измерений, и от условий измерений и т.д.

С использованием чисел указанного выше ряда чисел разработаны следующие условные обозначения классов точности СИ, наносимые на них.

- 1. Класс точности указывают просто одним из чисел приведенного выше предпочтительного ряда \mathbf{p} (например, 1,5). Это используют для СИ, у которых предел допускаемой приведенной погрешности постоянен (присутствует только аддитивная погрешность), как в (6.1), X_n в (6.5) выражена в единицах измеряемой величины. Таким способом обозначают классы точности вольтметров, амперметров, ваттметров и большинства других однопредельных и многопредельных приборов с равномерной шкалой или степенной (с показателем степени не более двух) шкалой.
- 2. Класс точности указывает числом из приведенного выше ряда, под которым ставится треугольная скобка, например, 1.5. Такое обозначение применяют для приборов с резко неравномерной шкалой, для которых X_n выражают в единицах длины шкалы (мм, см, условных делениях). В этом случае при измерении, кроме значения измеряемой величины, обязательно должен быть записан отсчет X в единицах длины шкалы и предел X_n в этих же единицах, иначе нельзя будет вычислить погрешность результата. Таким способом обозначают класс точности омметров.

- 3. Число, обозначающее класс точности, обводят кружком например, . Такое обозначение применяют для СИ, у которых предел допускаемой относительной погрешности постоянен во всем диапазоне измерений (имеется только мультипликативная погрешность, (**a** в (6.2) равна нулю) и его определяют по (6.4). Таким способом нормируют погрешности измерительных мостов, магазинов, масштабных преобразователей. При этом обычно указывают границы рабочего диапазона, для которых справедлив данный класс точности.
- 4. Класс точности обозначается двумя числами, записываемыми через косую черту, т. е. в виде условной дроби $\mathbf{c/d}$, например, 0.02 / 0.01. Такое обозначение применяют для СИ, у которых погрешность нормирована по двухчленной формуле (6.2). Таким способом указывают классы точности цифровых вольтметров, высокоточных потенциометров постоянного тока и других высокоточных приборов.

6.3 Стандартная форма записи результата однократных и многократных измерений

Запись результата однократного измерения производится следующим образом:

$$A = X \pm \Delta$$

Где X – показание измерительного прибора,

 Δ - предел допустимой абсолютной погрешности, определяемой по паспортным данным измерительного прибора.

При оценивании результата измерений вычисляются:

- а) абсолютная погрешность, которая используется для округления результата и его правильной записи:
- б) относительная и приведенная погрешности, применяемые для сравнения точности результата и прибора

Запись результата прямых многократных измерений производится следующим образом:

$$A = \bar{x} \pm \Delta$$
; α

- где \bar{x} среднее арифметическое значение измеряемой величины, вычисляемое по формуле (2.22):
 - Δ и α доверительный интервал, определяемый соотношением (5.8), и доверительная вероятность, задаваемая условиями проведения эксперимента, соответственно.

При записи результата измерения необходимо пользоваться правилами округления.

Правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного экспериментального результата:

- погрешность результата измерения указывают двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной, если первая равна 3 и более;
- результат измерения округляют до того же десятичного разряда, которым заканчивается значение абсолютной погрешности;
- округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления выполняются с одним - двумя лишними разрядами.

Значащими цифрами называют все цифры, включая 0, если он стоит в середине или конце числа.

Контрольные вопросы

- 1. Что называют средством измерения?
- 2. Как классифицируются средства измерений:
 - по функциональному назначению;
 - по точности?
- 3. Каким образом производится нормирование погрешностей средств измерений?
- 4. Что такое класс точности средств измерений и какими способами он обозначается?

- 5. Какова процедура метрологической оценки прямого однократного измерения по паспортным данным используемого средства измерений?
- 6. Какова форма записи результата прямого однократного измерения?
- 7. Как производится передача размеров физических величин?

РАЗДЕЛ IV. ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ

Лекция 7. Измерение тока и напряжения.

7.1 Измеряемые параметры напряжений

В телекоммуникационных системах преобладающим является измерение напряжения. Поэтому будем рассматривать вопросы измерения напряжения, по значениям которого при необходимости вычисляется сила тока.

При измерении постоянного напряжения оценивается величина и полярность. Измерение параметров напряжения переменного тока является сложной метрологической задачей, связанной с обеспечением требуемого частотного диапазона и учетом формы кривой измеряемого напряжения.

Для характеристики переменного напряжения используют следующие параметры:

- среднее значение (постоянная составляющая) U_{θ}

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)dt = \frac{1}{T} Su(t)$$
 (7.1)

где Su(t) - площадь, занимаемая кривой напряжения;

- средневыпрямленное значение U_{cs}

$$U_{cs} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} |u(t)| dt \tag{7.2}$$

- среднеквадратическое (действующее, эффективное) значение

$$U_{\scriptscriptstyle CK} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} u^{2}(t)dt} \tag{7.3}$$

Для несинусоидального напряжения, разложенного в ряд Фурье, т.е.

$$u(t) = U_0 + \sum_{i=1}^{N} U_{m_i} \cdot Sin(iwt + \varphi_i)$$
(7.4)

среднеквадратическое значение напряжения получается равным

$$U_{c\kappa} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{U_{m_i}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$
 (7.5)

Максимальное (амплитудное, пиковое) значение U_m — наибольшее мгновенное значение напряжения на интервале наблюдения, на периоде для периодических сигналов.

В соответствии с ГОСТ 16465-70 термины "амплитудное", "пиковое", "действующее" и "эффективное" значения сигнала являются не рекомендуемыми к употреблению.

Перечисленные параметры связаны между собой посредством следующих коэффициентов:

Формы
$$K_b = U_{c\kappa}/U_{cs}$$
 (7.6)

Амплитуды
$$K_a = U_m / U_{c\kappa}$$
 (7.7)

Усреднения
$$K_v = K_d \cdot K_d = U_m / U_{cs}$$
 (7.8)

7.2. Классификация вольтметров

В зависимости от применяемого метода измерения напряжения вольтметры подразделяют на приборы непосредственной оценки и приборы, работающие на методе сравнения с мерой.

В зависимости от структурной схемы вольтметры разделяются на:

1 - электромеханические;

- 2 электронные аналоговые;
- 3 электронные цифровые.

В зависимости от рабочего диапазона частот вольтметры делят на:

- 1 низкочастотные:
- 2 высокочастотные;
- 3 сверхвысокочастотные;
- 4 широкополосные.

В зависимости от вида измеряемого напряжения вольтметры обозначают:

- 1 В2 постоянного тока;
- 2 В3 переменного тока;
- 3 В4 импульсные;
- 4 В5 фазочувствительные;
- 5 В6 селективные;
- 6 В7 универсальные.

B зависимости от характера измеряемого значения переменного напряжения вольтметры подразделяют на:

- 1 амплитудные (пиковые);
- 2 среднеквадратического (действующего) значения;
- 3 средневыпрямленного значения.

7.3 Электромеханические приборы

Электромеханические приборы относятся к классу приборов непосредственной оценки и состоят из двух частей: измерительного преобразователя и измерительного механизма. В измерительном преобразователе измеряемая величина преобразуется в электрическую, удобную для измерения измерительным механизмом. Измерительный механизм электромеханического прибора работает на принципе преобразования энергии электромагнитного поля измеряемой величины в механическую энергию, т.е. в перемещение стрелки в приборе. Измерительные механизмы различаются способом преобразования электромагнитной энергии в механическую. Наибольшее распространение в телекоммуникационных системах нашли следующие системы измерительных механизмов:

- 1. магнитоэлектрические, основанные на взаимодействии поля постоянного магнита и одного или нескольких контуров с электрическим током;
- 2. электромагнитные, основанные на взаимодействии поля соленоида с сердечником из магнитомягкого материала;
- 3. электродинамические, основанные на взаимодействии подвижных и неподвижных контуров с токами;
- 4. электростатические, основанные на взаимодействии электрически заряженных тел.

Каждый измерительный механизм электромеханического прибора состоит из подвижной и неподвижной частей, на которые действуют механические силы, пропорциональные значению измеряемой электрической величины. Они создают вращающий момент относительно оси подвижной части, под влиянием которого она совершает угловое перемещение. Для отсчета измеряемой величины необходимо, чтобы каждому значению измеряемой величины и, значит, действующему моменту соответствовало определенное отклонение подвижной части. Для этого в измерительном механизме создается противодействующий момент, направленный навстречу действующему и возвращающий подвижную систему в равновесие. На основании анализа процессов, протекающих в измерительном механизме, получают соотношения для установившегося режима работы электромеханического прибора в виде уравнения шкалы.

Под действием измеряемого сигнала стрелка измерительного прибора отклоняется, прибор откликается, обеспечивая $U_{\rm отк}$. Величина $U_{\rm отк}$ определяется значением измеряемого сигнала $U_{\rm вx}$ и свойствами измерительного механизма А. Напряжение, в котором прибор отградуирован ($U_{\rm град}$), связано с напряжением отклика с помощью коэффициента градуировки



Рисунок 7.1.

Рассмотрим кратко основные свойства простейших электромеханических приборов.

1) *Приборы магнитоэлектрической системы* конструктивно представляют собой постоянный магнит и контур с током, выполненный в виде катушки. Они откликаются на постоянную слагаемую сигнала и градуируются также в этих значениях, т.е. коэффициент градуировки c=1.

Достоинства: 1- высокая чувствительность, 2- хорошая защищенность от внешних магнитных полей, 3- малое собственное потребление энергии, 4- приборы могут быть выполнены высокого класса точности.

Недостатки:1- прибор измеряет только постоянную составляющую сигнала, 2- прибор бо-ится перегрузок.

Область применения – микро- и миллиамперметры в цепях постоянного тока, а с преобразованиями и в цепях переменного тока.

2) *Приборы электромагнитной системы*. Основаны на взаимодействии поля неподвижной катушки с полем сердечника из магнитного металла, они откликаются и градуируются в среднеквадратических значениях измеряемого тока или напряжения, т.е. коэффициент градуировки с= 1.

Достоинства: 1- простота конструкции, 2- не боится перегрузок.

Недостатки: 1- невысокая точность, 2- подвержен действию внешних полей.

Для защиты от внешних электромагнитных влияний используют экранирование и астазирование, сущность которого заключается в использовании двух катушек, включаемых так, чтобы собственные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 были направлены в противоположные стороны. В этом случае появление внешнего магнитного потока не приведет к изменению среднего значения собственного магнитного потока.

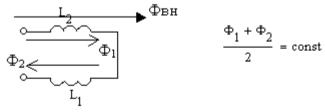


Рисунок 7.2.

3) *Приборы электродинамической системы* основаны на взаимодействии магнитных полей системы подвижных и неподвижных контуров с токами в виде катушек, они откликаются и градуируются в среднеквадратических значениях измеряемого тока или напряжения, т.е. коэффициент градуировки с= 1.

Достоинства: 1- прибор автоматически измеряет среднюю мощность сигнала, 2- прибор может быть выполнен высокого класса точности.

Недостатки: 1- низкая чувствительность, 2-большие габариты, 3-слабая защищенность от внешних магнитных полей, 4- низкий диапазон рабочих частот.

Ферродинамические приборы отличаются тем, что неподвижная катушка имеет магнитный сердечник, позволяющий улучшить чувствительность, уменьшить габариты, но точность измерений уменьшается.

4) Электростатические приборы_ основаны на взаимодействии электрически заряженных проводников. Они откликаются и градуируются в среднеквадратических значениях напряжения, т.е. коэффициент градуировки с= 1. Достоинства: 1- при измерении постоянных напряжений прибор является практически идеальным вольтметром, 2- может измерять непосредственно большие значения напряжений, 3- при измерении переменных напряжений частотный диапазон рабочих частот лежит в пределах 10-20 МГц, при этом входное сопротивление носит емкостной характер. Недостатки:1- низкая чувствительность, 2- прибор измеряет только напряжение.

Все рассмотренные электромеханические приборы градуируются при подаче на них синусоидального сигнала и имеют коэффициент градуировки, равный 1, что приводит к независимости показаний указанных приборов от формы измеряемого напряжения.

7.4. Магнитоэлектрические приборы с преобразователями

Из анализа характеристик рассмотренных электромеханических приборов следует, что приборы магнитоэлектрической системы по сравнению с другими приборами обладают рядом существенных достоинств, однако для применения их в цепях переменного тока необходимо преобразование переменного тока в постоянный.

В качестве преобразователей переменного тока в постоянный могут использоваться:

- 1 термопреобразователи, такие приборы называются термоэлектрическими;
- 2 полупроводниковые диоды, такие приборы называются выпрямительными.

Термоэлектрические вольтметры

Термоэлектрические вольтметры представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с одной или несколькими термопарами. Термопреобразователь включает в себя нагреватель, по которому протекает измеряемый сигнал, и термопару, на концах которой возникает термоЭДС. В цепь термопары включен микроамперметр, измеряющий термоток. Под действием измеряемого тока i(t) в нагревателе выделяется тепловая энергия Q, величина которой пропорциональна квадрату измеряемого тока. Выделяемое тепло обеспечивает нагревание термопары, приводящее к возникновению термоЭДС и соответственно термотока $i_T(t)$, протекающего через микроамперметр $i_{np}(t)$. Поскольку переменный ток преобразуется в постоянный путем превращения электрической энергии в тепловую, прибор будет откликаться на среднеквадратическое значение измеряемого напряжения и градуироваться также в этих значениях, т.е. c=1.

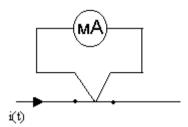


Рисунок 7.3 4.1

$$i(t) \rightarrow Q = k \cdot i(t) \rightarrow E_T \rightarrow i_T(t) = i_{\pi p}(t)$$
 (7.10)
 $V_{\text{отк}} = V_{\text{ск}}$ (7.11)

$$c = 1$$

$$c = \frac{X_{\text{град}}}{X_{\text{отк}}}$$
(7.12)

Достоинства:

- 1) C=1 означает, что показания такого прибора не зависят от формы измеряемых напряжений;
- 2) можно производить градуировку на постоянном токе;
- 3) широкий диапазон рабочих частот (до 10 МГц).

Недостатки:

- 1) малый срок службы термопары даже при нормальных условиях эксплуатации;
- 2) чувствительность термопары к электромагнитным, механическим и другим воздействиям;
- 3) необходимость применения измерительного механизма повышенной чувствительности.

Чаще всего на основе термоэлектрической системы конструируют высокочастотные амперметры, измеряющие токи в достаточно широком диапазоне частот.

Выпрямительные приборы

Выпрямительные приборы представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с одним или несколькими полупроводниковыми преобразователями. Основные операции, выполняемые схемой такого прибора следующие: преобразование измеряемого напряжения с помощью полупроводникового диода, выделение постоянной составляющей и ее измерение с помощью магнитоэлектрического прибора.

В зависимости от схемного решения различают выпрямительные приборы:

- а) с однополупериодным выпрямлением;
- б) с двухполупериодным выпрямлением.

Магнитоэлектрический прибор реагирует на постоянный (средневыпрямленный) ток, т. е.

Выпрямительный прибор будет откликаться на средневыпрямленное значение, а градуироваться в среднеквадратических значениях синусоидального сигнала. Эти величины в соответствии с (4.6) связаны между собой коэффициентом усреднения, который в данных приборах будет являться коэффициентом градуировки. Это значит, что коэффициент градуировки будет отличаться от 1 (в схеме с однополупериодным выпрямлением с=2,22, с двухполупериодным выпрямлением с=1,11) и показание такого прибора будут содержать методическую погрешность, зависящую от формы измеряемого напряжения.

Упрощенные схемы выпрямительных приборов с однополупериодным (рис.7.4) и двухполупериодным (рис.7.6) выпрямлением, а также форма токов в измерительном приборе показана на рисунках 7.5 и 7.7 соответственно.

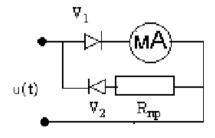
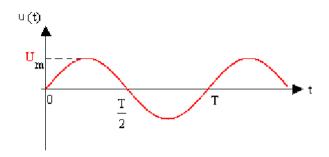


Рисунок 7.4.



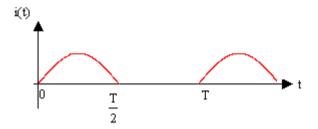


Рисунок 7.5

$$V_{\text{OTK}} = V_{\text{CB}} = \frac{1}{T} \cdot \int_{0}^{T} |U(t)| dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{0}^{\frac{T}{2}} V_{\text{m}} \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{V_{\text{m}}}{\pi}$$
 (7.13)

$$c = \frac{V_{CK}}{V_{CB}} = K_{\Phi}$$
 (7.14)

$$V_{\text{град}} = c \cdot V_{\text{отк}} = 2.22 \cdot V_{\text{св}} = 2.22 \cdot \frac{V_{\text{m}}}{\pi}$$
 $c=2.22$ (7.15)

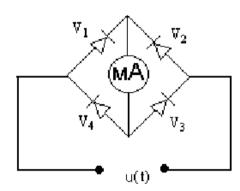


Рисунок 7.6.

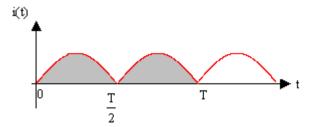


Рисунок 7.7

$$V_{\text{OTK}} = \frac{2}{T} \cdot \int_{0}^{\frac{T}{2}} V_{\text{m}} \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{2V_{\text{m}}}{\pi}$$
 (7.16)

Основные характеристики выпрямительных приборов: Достоинства:

- 1) простота конструкции;
- 2) высокая чувствительность;
- 3) широкий диапазон рабочих частот ($50...10^5$ Γ ц)

Недостатки:

- 1) погрешность, обусловленная зависимостью показаний приборов от температуры;
- 2) дополнительная погрешность от частоты измеряемого сигнала из-за наличия емкости обратного перехода полупроводникового диода.

Для уменьшения этих недостатков вводят схемы частотной и температурной компенсации.

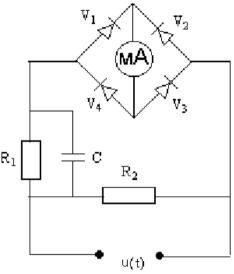


Рисунок 7.8.

 R_1 – из металла

 R_2 – из сплава – манганин (металл, не зависящий от температуры)

При увеличении температуры t величины сопротивлений изменяются: R_1 — увеличивается, сопротивление моста R_2 остается постоянным, а результирующее сопротивление схемы практически не изменяется. Для компенсации частотной погрешности ставится конденсатор C.

Выпрямительные приборы выполняются в виде многопредельных и многоцелевых лабораторных приборов, называемых тестерами.

7.5. Аналоговые электронные вольтметры.

Обобщенная структурная схема аналоговых электронных вольтметров (рис.7.9) содержит максимальное число блоков, некоторые из которых в зависимости от назначения вольтметра могут отсутствовать. В электронных вольтметрах, снабженных усилительными устройствами потребление мощности из измерительной цепи ничтожно мало. К достоинствам электронных вольтметров относятся: широкие пределы измерения и частотный диапазон (от 20 Гц до 1000 МГц), высокая чувствительность, хорошая перегрузочная способность.



- 1. Входное устройство предназначено для:
 - а) ослабления сигнала в заданное число раз, позволяющего расширить диапазон в сторону больших измеряемых напряжений;
 - б) обеспечения входных параметров вольтметра: входного сопротивления в пределах 1-10 МОм, входной емкости 1-30 пФ.

Усилители переменного тока служат для:

- а) повышения чувствительности;
- б) расширения динамического диапазона в сторону меньших измеряемых напряжений.

Для выполнения указанных задач усилители переменного тока должны иметь заданный и высокостабильный коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот и температур, малые нелинейные искажения, малые собственные шумы и быть нечувствительными к колебаниям напряжения питания, что достигается использованием многокаскадных усилителей, охваченных отрицательной обратной связью.

- 3. Усилители постоянного тока служат для обеспечения согласования небольшого внутреннего сопротивления магнитоэлектрического измерительного механизма с большим сопротивлением нагрузки преобразователя. К усилителям постоянного тока предъявляются жесткие требования в отношении постоянства коэффициента усиления и малого дрейфа нуля, т. е. медленного изменения выходного сигнала при отсутствии на входе информационного сигнала. Они выполняются в виде мостовых схем с отрицательной обратной связью.
- 4. Преобразователи служат для преобразования переменного тока в постоянный, в качестве преобразователей служат детекторы. Детекторы можно классифицировать по функции преобразования входного напряжения в выходное на следующие типы: квадратичные, линейные, амплитудные (пиковые). Тип детектора во многом определяет свойства прибора: так вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными; вольтметры с квадратичными детекторами позволяют измерять напряжения любой формы; вольтметры с линейными детекторами пригодны только для измерения гармонического сигнала, но являются самыми простыми, надежными и дешевыми.

Аналоговые электронные вольтметры могут строиться по двум основным схемам: усилитель – преобразователь и преобразователь – усилитель. Первая из схем обладает большой чувствительностью, но частотный диапазон у таких вольтметров определяется полосой пропускания усилителя переменного тока и составляет сотни килогерц; вторая схема используется в вольтметрах для измерения напряжения значительного уровня, т.к. обеспечить большое усиление с помощью усилителя постоянного тока сложно, зато частотный диапазон таких усилителей и, соответственно вольтметров, может составлять сотни мегагерц.

Электронные вольтметры могут иметь открытый или закрытый вход по отношению к постоянной составляющей измеряемого напряжения. При закрытом входе схема вольтметра содержит разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую сигнала, при открытом входе такого конденсатора нет и на блоки вольтметра поступает как переменная, так и постоянная составляющая сигнала.

Элементная база, используемая при создании вольтметров переменного напряжения, определяется существующим на момент создания вольтметров уровнем техники (от полупроводников образцов до микроинтегрального исполнения), однако функциональное назначение блоков остается неизменным.

Вольтметры переменного тока (типа ВЗ)

Вольтметры переменного тока строятся по схеме усилитель-преобразователь. В качестве преобразователей могут использоваться квадратичные или линейные детекторы.

Если применяются квадратичные детекторы, то такие вольтметры называются вольтметрами среднеквадратических значений, их структурная схема приведена на рис. 7.10.



Рисунок. 7.10.

Квадратичный детектор преобразует переменное напряжение в постоянное, пропорциональное, согласно формуле (7.5), квадрату среднеквадратического значения измеряемого напряжения. Значит, измерение среднеквадратического напряжения связано с выполнением трех операций: возведение в квадрат мгновенного значения сигнала, усреднение и извлечение корня из результата усреднения (последняя операция обычно осуществляется при градуировки шкалы вольтметра). Возведение в квадрат мгновенного напряжения как правило производят с помощью полупроводникового диода, используя начальный участок вольт-амперной характеристики, описываемой квадратичной зависимостью. Однако протяженность квадратичного участка характеристики обычно невелика (не более 100 мВ), одним из методов для расширения этого участка является метод кусочно-линейной аппроксимации. Для этого в схему детектора включают несколько диодных ячеек и подбором напряжения смещения на диодах получают суммарную вольт-амперную характеристику, приближающуюся по форме к квадратичной кривой (рис. 7.11).

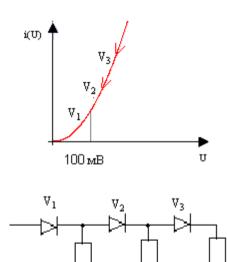


Рисунок 7.11.

Если в вольтметрах переменного тока применяются линейные детекторы, то такие вольтметры называются вольтметрами средневыпрямленных значений, структурная схема таких вольтметров приведена на рис. 7.12.



Рисунок 7.12

В таких вольтметрах в качестве преобразователя используется линейный детектор, преобразующий переменное напряжение в постоянный ток, пропорциональный средневыпрямленному значению измеряемого напряжения. Такие преобразователи выполняются по схемам двухполупериодного выпрямления и используют линейный участок вольт-амперной характеристики полупроводникового диода. Аналоговый вольтметр средневыпрямленных значений по сравнению с выпрямительным вольтметром имеет более высокую чувствительность и меньшее потребление мощности от измерительной цепи. Эти вольтметры откликаются на средневыпрямленное значение, градуируются в среднеквадратических значениях и имеют коэффициент градуировки C=1.

Импульсные вольтметры (типа В4)

Импульсные вольтметры строятся по схеме преобразователь - усилитель, в качестве преобразователя используется амплитудный детектор, напряжение на выходе которого соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого сигнала. Структурная схема импульсного вольтметра приведена на рис. 7.13.

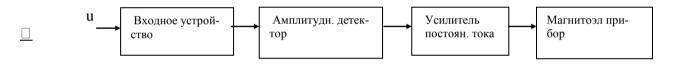


Рисунок. 7.13

Отличительной особенностью амплитудного (пикового) детектора является наличие элемента памяти, которым служит конденсатор, «запоминающий» пиковое значение измеряемого напряжения.

Простейшие схемы амплитудных детекторов:

- а) детектор с последовательным включением диода (детектор с открытым входом);
- б) детектор с параллельным включением диода (детектор с закрытым входом).

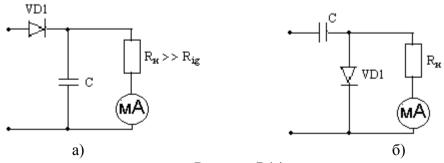


Рисунок 7.14

Амплитудный детектор осуществляет преобразование переменного сигнала в постоянный, пропорционально значению входного сигнала, поэтому такие вольтметры откликаются на максимальные значения, градуируются в максимальных значениях и имеют C=1.

Универсальный вольтметр (типа В7)

Универсальный вольтметр позволяет измерять как постоянный, так и переменный ток. При измерении переменного напряжения вольтметр имеет схему преобразователь - усилитель. В качест-

ве преобразователя используется амплитудный (пиковый) детектор, напряжение на выходе которого соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого сигнала. При измерении постоянного напряжения оно через входное устройство подается на усилитель постоянного тока и обеспечивает отклонение стрелки магнитоэлектрического измерительного механизма. Структурная схема универсального вольтметра приведена на рис. 7.15.



Амплитудный детектор осуществляет преобразование переменного сигнала в постоянный, пропорциональный максимальному значению входного сигнала, поэтому такие вольтметры откликаются на максимальное значение сигнала, градуируются в среднеквадратических значениях. Эти параметры переменного напряжения связаны между собой в соответствии с (7.7) коэффициентом амплитуды, поэтому коэффициент градуировки универсального вольтметра равен

$$C = \frac{1}{K_a} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.71.$$

Характеристики рассмотренных вольтметров приведены в таблице 7.1.

Таблина 7.1

| Тип вольтметра | Тип преобра- зователя | Значение напряжения, на ко- | Значение напряжения, | Значение коэффи- |
|----------------------------|--------------------------|--|--|----------------------------|
| | | торое откликается вольтметр, U _{отк} | в котором отградуирован вольтметр, $U_{\text{град}}$ | циента градуиров- ки, С |
| Универсальный У/В | Макс. значение | U_{m} | U_{ck} | 0.71 |
| Импульсный И/В | Макс. значение | U_{m} | U_{m} | 1 |
| Средневыпрям. знач. С/В | Средневыпям. знач. | $ m U_{cb}$ | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | 1.11 |
| Среднеквадр. знач. С/К | Среднеквадр. знач. | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | $U_{c\kappa 1}$ | |
| Выпрямит. В1 В2 | Средневыпям. знач. | $ m U_{cb}$ | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | 2.22 - B/2 1.11 - B/1 |
| Теромоэлектр. Т/Э | Среднеквадр. знач. | $ m U_{c\kappa}$ | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | 1 |
| Электростат. Э/С | _ | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | 1 |
| Электродин. Э/Д | _ | $ m U_{c\kappa}$ | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | 1 |
| Электромагн. Э/М | | $ m U_{c\kappa}$ | $\mathrm{U}_{c\kappa}$ | 1 |
| Магнитоэлектр М/Э | _ | U_0 | U_{0} | 1 |

В/1 – выпрямительный с однополупериодной схемой выпрямления

В/1 – выпрямительный с двухполупериодной схемой выпрямления

Для усвоения материала курса по разделу «Измерение тока и напряжения» предусматривается решение задач по определению показаний вольтметров при различных формах измеряемых напряжений.

Для определения показаний вольтметров необходимо выполнить следующие операции:

- 1) Записать математическую модель измеряемого напряжения;
- 2) Учесть тип входа; при закрытом входе вычислить постоянную слагаемую и убрать её из измеряемого напряжения;
- 3) Найти напряжение, на которое откликается вольтметр $U_{\text{отк}}$;
- 4) Найти показания вольтметра U=CU_{отк}

Характеристики вольтметров различных систем, необходимых при решении таких задач, берутся из таблицы 7.1.

Следует отметить, что наиболее близкими измерительными приборами к вольтметрам являются псофометры и измерители уровня.

Псофометр — это электронный вольтметр среднеквадратических значений, амплитудночастотная характеристика усилителя которого определяется характеристикой, входящего в него псофометрического фильтра. Псофометрический фильтр отражает частотную характеристику избирательности органов восприятия, и вид ее установлен на основе экспериментальных исследований и рекомендаций МККТТ. Обычно в состав прибора входят два псофометрических фильтра — с телефонной и вещательной псофометрическими характеристиками.

Измеритель уровня — это квадратичный вольтметр, шкала которого проградуирована в логарифмических единицах (децибелах). Специфическим для измерителя уровня является также возможность устанавливать определенные значения входного сопротивления: 600 Ом, что соответствует входному и выходному сопротивлениям канала тональной частоты, 150, 135 и 75 Ом для групповых трактов.

7.6 Цифровые электронные вольтметры

Обобщенная структурная схема вольтметра

Цифровой вольтметр (ЦВ) - это средство измерений, в котором измеряемая непрерывная величина - напряжение автоматически преобразуется в дискретную, подвергается цифровому кодированию, а результат измерения представляется в цифровой форме.

Цифровые вольтметры позволяют измерять как постоянное, так и переменное напряжения.

В первом случае применяются цифровые вольтметры постоянного тока (ЦВПТ), во втором случае переменное напряжение предварительно преобразуют в постоянное напряжение, измеряемое ЦВПТ. U_x На рис. .7.16 показана обобщенная структурная схема ЦВ.

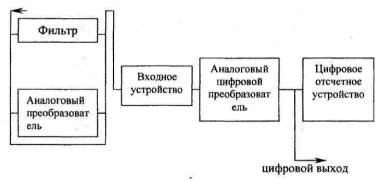


Рисунок 7.16.

При измерении постоянного напряжения оно может поступать на выходное устройство непосредственно или через фильтр, необходимый для подавления помех промышленной частоты 50 Гц и ее гармоник. Входное устройство обеспечивает высокоомный вход и расширение пределов измерения. С его выхода аналоговый сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) "напряжение - код ", а цифровой код с выхода последнего - на цифровое отчетное устройство, а также на цифровой выход.

Метрологические характеристики ЦВ определяются видом используемого АЦП. Поэтому ЦВ классифицируются в соответствии с применяемым видом АЦП, из которых наибольшее применение получили преобразователи:

- 1) время-импульсные;
- 2) частотно-импульсные;
- 3) кодо-импульсные.

Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием

В цифровых вольтметрах, содержащих АЦП с время-импульсным преобразованием, входное напряжение U_x сперва преобразуется по временной интервал Δt_x , который затем преобразуется в цифровой унитарный код и измеряется числом заполняющих его импульсов N со стабильной частотой следования.

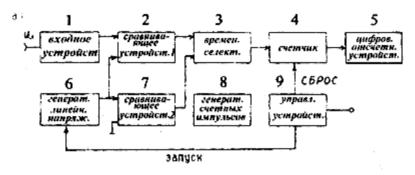
Наибольшее распространение получили:

- 1) АЦП с генераторами линейно-изменяющегося напряжения (ГЛН)
- 2) АЦП с двухтактным интегрированием.

Цифровые вольтметры с генераторами линейно-изменяющегося напряжения

На рис. 7.17 приведена структурная схема цифрового вольтметра с ГЛН и временные диаграммы, поясняющие его работу.

Вольтметр работает циклами, длительность которых T устанавливается с помощью управляющего устройства и обычно равна или кратна периоду питающей сети. В начале цикла импульс управляющего устройства запускает генератор линейно-изменяющегося образцового напряжения и сбрасывает показания предыдущего цикла, заполнявшие счетчик (рис. 7.17б). Входное напряжение $U_{\rm x}$ и образцовое напряжение $J_{\rm ofp}$ поступают на входы сравнительного устройства и в момент их равенства t_I (рис. 7.17в) на выходе последнего возникает импульс, открывающий временной селектор (рис. 7.17г); через него на электронный счетчик начинают проходить импульсы от генератора счетных импульсов с частотой f_{cr} (рис. 7.17е), или периодом T_{cr} .



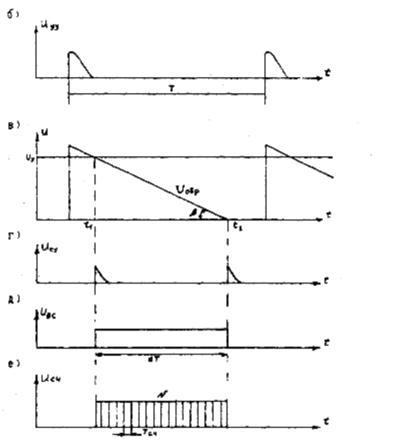


Рисунок 7.17.

В момент времени t_2 , когда образцовое напряжение достигнет нуля, второе сравнивающее устройство вырабатывает импульс, закрывающий временной сектор; прохождение счетных прекращается, и на табло цифрового отчетного устройства появляются показания, пропорциональные числу счетных импульсов N, прошедших через временной селектор за интервал времени:

$$\Delta T = t_2 - t_1 \tag{7.17}$$

Из диаграммы напряжений следует, что

$$U_x = \Delta T \cdot tg\beta; \Delta T = NT_{cr} = \frac{N}{f_{cr}}$$
 (7.18)

Множитель $tg\beta$ численно равен скорости V изменения образцового напряжения, В/С. Подставляя ΔT и V, получаем

$$U_x = \frac{\nu N}{f_{cr}} = kN$$
 , где (7.19)

$$k = \frac{v}{f_{cr}} = const \tag{7.20}$$

Коэффициент k устанавливается равным 10^{-т},

где m=0,1,2....

Показатель степени m изменяется при переключении пределов измерения, что отражается в положении запятой в цифровом отсчете.

Главным достоинством этих вольтметров является их сравнительная простота.

Цифровые вольтметры с двухтактным интегрированием

Структурная схема и временные диаграммы работы цифрового вольтметра с двухтактным интегрированием приведены на рис. 7.18.

Управляющее устройство задает цикл измерений $T_{\rm u}$ и вырабатывает импульс первого такта длительностью $T_{\rm 1}$, (рис. 7.18б). В течение известного интервала $T_{\rm 1}$, ключ находится в положении I и измеряемое напряжение $U_{\rm x}$ подается на вход интегратора (первый такт интегрирования) (рис. 7.18в).

В момент окончания импульса T его срез дифференцируется (рис. 7.18г) и короткий отрицательный импульс переводит триггер в состояние "I", открывающие временной селектор (рис. 4.15д). Одновременно ключ перебрасывается в положение 2 и к интегратору подается известное напряжение $U_{oбp}$ от источника опорного напряжения в течение интервала $T_{\rm x}$ от конца первого такта до момента равенства нулю выходного напряжения интегратора (второй такт интегрирования) (рис. 7.18в). Для того, чтобы в течении второго такта происходит разряд интегратора, полярность напряжения $U_{oбp}$ должна быть противоположна полярности напряжения $U_{\rm x}$. В момент равенства нулю напряжение на выходе интегратора сравнивающие устройство переводит триггер в состояние "0" и временной селектор закрывается (рис. 7.18д). Следовательно, счетные импульсы, вырабатываемые генератором счетных импульсов, проходят через временной селектор на электронный счетчик и цифровой индикатор в течение интервала времени второго такта $T_{\rm x}$ (рис. 7.18с).

Таким образом, в течение первого такта интегратор заряжается до некоторого напряжения, в течение второго такта разряжается до нуля.

Значит, справедливо соотношение

$$\frac{1}{R_{1}C} \int_{0}^{t_{1}} U_{x} dt - \frac{1}{R_{2}C} \int_{t_{1}}^{t_{2}} U_{o\delta p} dt = 0$$

$$\text{где } \tau_{2ap} = R_{1}C, \quad \tau_{pas} = R_{2}C$$

$$\frac{U_{x}T_{1}}{R_{1}C} - \frac{U_{o\delta p}T_{x}}{R_{2}C}$$
(7.21)

Вычислив интегралы, получим

откуда
$$U_x=rac{U_{olip}R_1}{R_2T_1}T_x=kT_x=kT_{cr}N=k_1N,$$
 где $N=rac{T_x}{T_{cr}},\quad \mathbf{k}_1=kT_{cr}$

Из этого соотношения видно, что измеряемое напряжение пропорционально полученному временному интервалу $T_{\rm x}$ и, значит, числу импульсов N, прошедших на счетчик за интервал $T_{\rm x}$. Важнейшим достоинством этого метода преобразования является высокая помехоустойчивость (порядка 60 дБ) при условии, что длительность первого такта интегрирования кратна периоду помехи.

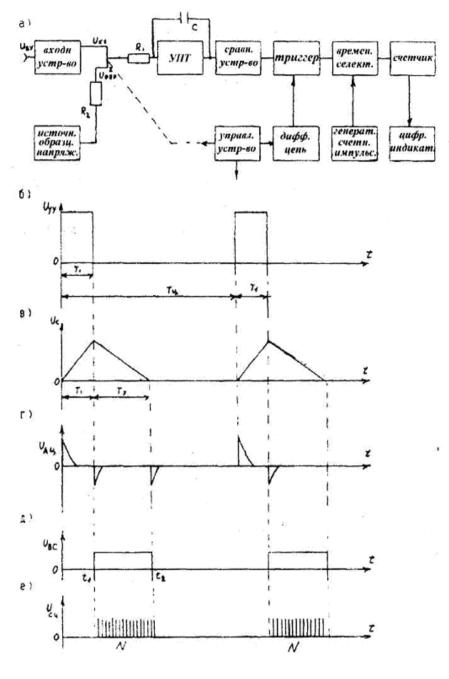


Рисунок 7.18

Цифровой вольтметр с частотно-импульсным преобразованием

Принцип действия заключается в преобразовании измеряемого напряжения в пропорциональную ему частоту следования импульсов, измеряемую цифровым частотомером.

Структурная схема такого вольтметра содержит преобразователь "напряжение частота", на вход которого подается измеряемое напряжение U_x , а на выходе образуется импульс с частотой $f_x = pUx$, где p - коэффициент преобразования.

Существует много разновидностей преобразователей "напряжение - частота".

Одна из схем вольтметра с преобразователем "напряжение - частота" на базе интегратора и временные диаграммы работы приведены на рис. 7.19.

Измеряемое напряжение U_x поступает на вход интегратора и конденсатор С заряжается по закону

$$U_c = \frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_x dt \tag{7.19}$$

Через интервал времени T_1 , напряжение на конденсаторе достигает значения U_{o6p} , получаемого от источника образцового напряжения (рис. 7.19 б)

$$U_{c} = \frac{U_{x}T_{1}}{R_{1}C} = U_{o6p} \tag{7.20}$$

В этот момент сравнивающее устройство включает формирующее устройство, вырабатывающее отрицательный импульс обратной связи с постоянной площадью, равной произведению U_{oc} T_2 (рис. 7.19 в). Этот импульс поступает через резистор R_2 на вход интегратора и разряжает конденсатор С до нуля. Время разряда равно Т2. Далее процесс повторяется с периодом

$$T_x = T_1 + T_2 (7.21)$$

или с частотой

$$f = \frac{1}{T_{r}} \tag{7.22}$$

Процесс разряда конденсатора можно записать так:

$$\int_{0}^{t_{2}} \left(\frac{U_{0}.c.}{R_{2}C} - \frac{U_{x}}{R_{1}C} \right) dt = U_{c}$$
 (7.23)

Приравняв результат интегрирования (7.23) напряжению Uc из формулы (7.20), получаем

$$\frac{U_{0c}T_2}{R_2C} - \frac{U_xT_2}{R_1} = \frac{U_xT_1}{R_1} \tag{7.24}$$

и измеряемое напряжение прямо пропорционально fx , т. е.
$$U_x = \frac{R_1}{R_2} * \frac{T_2 U_{0,c.}}{T_1 + T_2} = k f_x \tag{7.25}$$

где $k = \frac{R_{\rm I}T_{\rm 2}U_{0.c}}{R_{\rm 2}}$ - постоянная величина для данного вольтметра.

Изменение U_x приведет к изменению T_1 , а значит и $f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{1}{T_1 + T_2}$

$$f_x = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{T_1 + T_2} \tag{7.26}$$

Измерение f_x осуществляется цифровым частотомером.

Импульсы частоты f_x пропускаются через временной селектор в течение известного интервала времени (рис. 7.19г). С помощью электронного счетчика число прошедших импульсов $N = f_x T_{oбp}$ фиксируется и отображается на цифровом индикаторе в единицах напряжения Ux. Интервал $T_{\text{обр}} =$ 20мс выбирается равным периоду сетевой помехи, которая усредняясь, ослабляется.

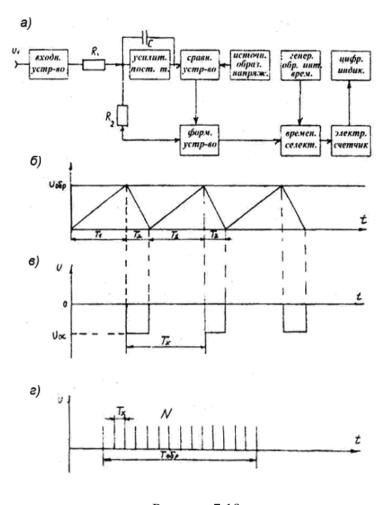


Рисунок 7.19

Цифровые вольтметры с кодоимпульсным преобразованием

В этих вольтметрах измеряемое напряжение уравновешивается компенсирующим образцовым напряжением, которое вырабатывается в цифро-аналоговом преобразователе (ЦАП).

Компенсирующее напряжение на выходе ЦАП представляет собой систему дискретных образцовых напряжений, величина которых изменяется по закону, например, с весами 1-2-4-8 или 1-2-4-4.

Цифровые вольтметры с кодоимпульсным преобразованием могут быть с развертывающим (поразрядными) уравновешиванием или следящего уравновешивания.

Структурная схема вольтметра с развертывающим уравновешиванием приведена на рис. 7.20а.

Принцип его работы заключается в сравнении измеряемого напряжения с рядом образцовых напряжений, величина которых изменяется в течении цикла измерений по жесткой программе до получения равенства или максимального значения. Измеряемое напряжение U_x через входное устройство подается на сравнивающее устройство. Управляющее устройство вырабатывает импульсы, устанавливающие длительность цикла Т (рис. 7.20б) в течение которого тактовые импульсы воздействуют на ЦАП. ЦАП представляет собой делитель напряжения быстродействующими электронными или электромагнитными переключателями. При поступлении очередного тактового импульса ЦАП последовательно выдает от источника образцового напряжения $U_{oбpi}$ в коде 8-4-2-1 (например 8, 4, 2, 1 В), проходящие на один из входов сравнивающего устройства.

Работу вольтметра рассмотрим на примере измерений $U_x = 5$ B (рис. 7.20в).

При воздействии первого импульса управляющего устройства на сравнивающее устройство с выхода ЦАП поступает первое значение $U_{oбpi}$. Если $U_{oбpi} > U_x$, сравнивающее устройство вырабатывает сигнал "много", который поступает на управляющее устройство, и в дешифраторе записывается "0" первого разряда, а напряжение $U_{oбpi}$ снимается.

Под действием второго тактового импульса поступает U_{o6p2} , если $U_{o6p2} < U_x$, то сравнивающее устройство вырабатывает сигнал "мало" и в дешифраторе записывается "І" второго разряда. Аналогичное сравнение дискретных значений образцовых напряжений и сумм напряжений тех разрядов, которые оказались записанными в дешифраторе, происходит до конца цикла и до получения равенства

$$U_x = \sum U_{o6pi} \tag{7.27}$$

Таким образом, измеряемому напряжению $U_x = 5$ B, соответствует кодовая запись 0101 (4+1), которая преобразуется в цифровом индикаторе в показание.

Вольтметр следящего уравновешивания работает не циклами, а в нем осуществляется непрерывное слежение за разностью между U_x и $\sum U_{o\delta pi}$ (сумма образцовых напряжений принимает большее или меньшее значение в зависимости от значения измеряемого напряжения). Когда достигается равенство $\sum U_{o\delta pi} = U_x$ (рис. 7.20г) код преобразуется в показание, а состояние прибора остается неизменным до тех пор, пока не изменится значение U_x . Преимуществом вольтметров следящего уравновешивания является меньшая погрешность и большее быстродействие, чем у вольтметров поразрядного уравновешивания. Основным недостатком является возможность возникновения автоколебательного режима прибора.

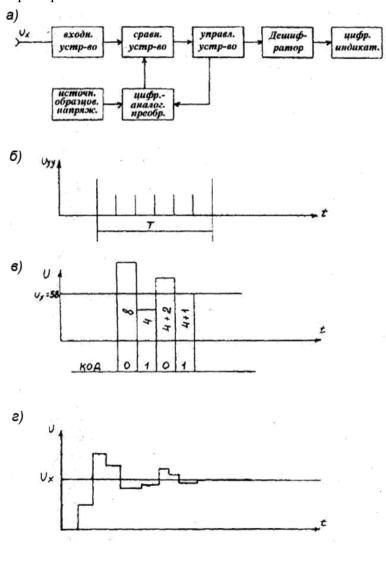


Рисунок 7.20

Основные метрологические характеристики цифровых вольтметров

Важнейшими метрологическими характеристиками ЦВПТ является диапазон измерений ($10^{-7} \div 10^3$ В), погрешность, быстродействие и помехоустойчивость. Общая погрешность (улучших образцов порядка 10^{-5}) нормируется обычно по двучленной формуле

$$\Delta = \pm (a+bx), \quad \delta = \pm \frac{100}{x}\% = [c+d(\frac{x_k}{x}-1)]\%$$

где a, b, c %, d % - постоянные коэффициенты;

х - измеряемая величина;

 x_{κ} - значение предела измерения.

Значения коэффициентов с и d можно выразить через а и b:

$$c = 100 \left(b - \frac{a}{x_k} \right) \%, \qquad d = 100 \frac{a}{x_k} \%$$

Класс точности ЦВ обозначается в виде c/d.

Проанализируем погрешности цифровых вольтметров, придерживаясь классификации их по слагаемым измерениям.

- 1. Погрешность меры. В вольтметрах различных типов применяются разнообразные меры, что обусловлено принципом построения прибора:
 - а) у вольтметров с время-импульсным преобразованием мерой служит кварцевый генератор счетных импульсов, с помощью которых измеряется интервал времени. Следовательно, погрешность меры это нестабильность частоты кварцевого генератора;
 - б) у вольтметров с частотно-импульсным преобразованием мерой является кварцевый генератор образцового интервала времени, используемого для измерения среднего за интервал значения частоты. Поэтому погрешности меры те же, что и у вольтметров с время импульсным преобразованием;
 - в) у вольтметров с кодо-импульсным преобразованием мера это источник образцовых напряжений. Ее погрешности обусловлены недостаточной точностью и нестабильностью образцовых напряжений.

2. Погрешность преобразования:

- а) для вольтметров время-импульсного типа с генераторами линейно изменяющегося напряжения при преобразовании измеряемого напряжения в пропорциональный ему интервал времени возникает погрешность, связанная с нелинейностью и непостоянством скорости измерения пилообразного напряжения, погрешностями сравнивающего устройства и формировании стробирующего импульса;
- б) для вольтметров время-импульсного типа с двухтактным интегрированием определяется погрешностью интегратора, нестабильностью образцового напряжения, погрешностями сравнивающего устройства;
- в) у вольтметра с частотно-импульсным преобразованием рассматриваемая погрешность это погрешность преобразования напряжения в частоту;
- г) у вольтметров с кодо-импульсным преобразованием зависит от погрешности сравнивающего устройства (от чувствительности и стабильности порога срабатывания).

3. Погрешность сравнения

При измерении напряжения сравнение сопровождается: погрешностью дискретности. Она возникает в результате квантования непрерывной измеряемой величины и обусловлена конечностью числа уровней квантования.

Замена истинных значений сигнала X квантовыми $X_{\kappa g}$ вносит погрешность округления

$$n_x - x_{\kappa \theta} - x$$

Эта погрешность равносильна наложению на истинные значения X помехи n_x . Поэтому последовательность помех (погрешностей округления) n_x в теории сигналов называют шумом квантования. В измерительной технике погрешность, возникающую в результате квантования, называют погрешностью дискретности.

Погрешность дискретности присуща время-импульсным методам измерения напряжения, характерна для вольтметра с частотно-импульсным преобразованием и проявляется после преобразования напряжения в частоту. Она возникает в следствие того, что моменты появления счетных импульсов не синхронизированы с фронтом и срезом заполняемых им временных ворот.

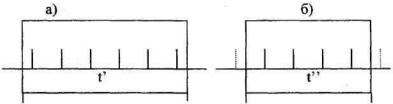


Рисунок 7.21

В реальной схеме непосредственно подсчитываются счетные импульсы, а не периоды их следования, и поэтому округление может производится как в сторону большего, так и в сторону меньшего значения. Максимальная величина абсолютной погрешности (при правильно выбранной схеме стробирования) составляет один период следования счетных импульсов, т.е. единицу младшего разряда счета. Это иллюстрируют рисунки рис. 7.21 а и 7.21 б.

Длительность t' и t" почти одинаковы и приблизительно равны пяти периодам следования счетных импульсов, однако в ситуации, показанной на рис. 7.20 б, - только четыре импульса. Быстродействие — скорость измерений есть максимальное число измерений в единицу времени, выполняемых с нормированной погрешностью. Быстродействие современных ЦВ может достигать $10^2 - 10^7$ измерений в секунду (кодо-импульсные).

Быстродействие приборов обычно не выше 10^2 измерений в секунду и определяется полосой пропускания входного устройства и быстродействие АЦП.

Помехоустойчивость нормируется обычно для сетевой помехи и оценивается степенью подавления помехи в децибелах

$$P = 20\lg \frac{U_{\text{nex}}}{U_{\text{near}}} \tag{7.28}$$

где U_{nex} и $U_{neыx}$, - напряжения помехи на входе и выходе прибора соответственно.

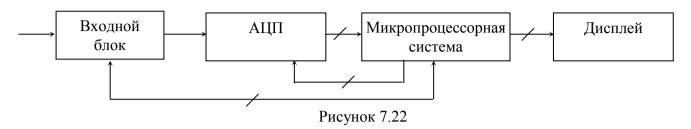
В заключении отметим, что время-импульсные вольтметры наиболее просты по схемному построению, кодо-импульсные - наиболее быстродействующие, позволяющие реализовать достаточно

высокую точность (10^{-4}) , частотно-импульсные - наиболее помехоустойчивые (до 60 дБ) и имеют более высокую точность измерения (10^{-3}) , чем время-импульсные.

7.7 Цифровые микропроцессорные вольтметры

Цифровые микропроцессорные вольтметры содержат встроенную микропроцессорную систему, осуществляющие сервисные операции обеспечение различных режимов измерений и определение ряда параметров измеряемых сигналов. Работа таких вольтметров выполняется в соответствии с программами, заложенными в запоминающем устройстве. Именно в вольтметрах наиболее полно осуществлены преимущества микропроцессорных измерительных приборов: дальнейшее повышение точности, расширение измерительных возможностей, упрощение и облегчения управления, возможность получения различных математических функций измеренных значений, статистическая обработка результатов наблюдений, самокалибровка и самодиагностика, повышение надежности и

экономичности, возможность построения программируемых многофункциональных приборов. Обобщенная структурная схема цифрового микропроцессорного вольтметра представлена на рис.7.22.



Входной блок содержит аналоговые преобразователи: аттенюатор, усилитель, фильтр, иногда и измерительный преобразователь напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока. При построении цифрового вольтметра следует правильно и рационально выбирать АЦП и микропроцессорную систему, осуществить их сопряжение, определить необходимые характеристики остальных модулей микропроцессорной системы, разработать программное обеспечение. Микропроцессорные цифровые вольтметры измеряют напряжения и постоянного и переменного тока, часто и сопротивление резистора. Они представляют собой многопредельные приборы с автоматическим и ручным переключением диапазонов измерений, приводят статистическую обработку результатов наблюдений, выполняют ряд специфических программ, существенно расширяющих возможности прибора, осуществляют автокалибровку. Эти приборы отличаются высокими метрологическими характеристиками.

Контрольные вопросы

- 1. Какими параметрами характеризуются измеряемые напряжения?
- 2. Как производится классификация вольтметров?
- 3. Каковы основные свойства электромеханических приборов различных систем:
- магнитозлектрической;
- электромагнитной;
- электродимической;
- электростатической?
- 4. Каковы основные свойства магнитоэлектрических приборов с преобразователями:
 - термоэлектрических;
 - выпрямительных?
- 5. Какова обобщенная структурная схема аналоговых электронных вольтметров?
- 6. Каковы основные свойства аналоговых электронных вольтметров:
 - среднеквадратических значений;
 - средневыпрямленных значений;
 - импульсных;
- универсальных?
- 7. Каким образом определяются показания вольтметров при измерении напряжений раз личной формы?
- 8. Какова обобщенная структурная схема электронных цифровых вольтметров?
- 9. Каков принцип действия цифровых вольтметров с различными АЦП:
- с время-импульсным;
- с кодо-импульсным;
- с частотно-импульсным?
- 10. Каковы основные метрологические характеристики цифровых вольтметров?