

УЧЕБНИК
ДЛЯ ВУЗОВ

ПИТЕР

И. Ф. Шишкин



Теоретическая метрология

Часть 2. Обеспечение единства
измерений

4-е издание

**РЕКОМЕНДОВАНО
МИНИСТЕРСТВОМ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**

Содержание



И. Ф. Шишкин

Теоретическая метрология

Часть 2. Обеспечение единства измерений

Рекомендовано Министерством образования и науки Российской Федерации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки «Метрология, стандартизация и сертификация»
и специальностям «Метрология и метрологическое обеспечение»,
«Стандартизация и сертификация»

4-е издание

 ПИТЕР®

Москва • Санкт-Петербург • Нижний Новгород • Воронеж
Ростов-на-Дону • Екатеринбург • Самара • Новосибирск
Киев • Харьков • Минск

2012

ББК 30.10я7
УДК 006.91(075)
Ш65



Шишкин И. Ф.
Ш65 Теоретическая метрология. Часть 2. Обеспечение единства измерений: Учебник для вузов. 4-е изд. — СПб.: Питер, 2012. — 240 с.: ил.

ISBN 978-5-459-00910-1

Во второй части учебника излагаются основы теории обеспечения единства измерений в свете последней редакции Закона РФ «Об обеспечении единства измерений» от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ. Уделяется внимание возможности обеспечения единства измерений при децентрализованном воспроизведении единиц.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 200501.65 «Метрология и метрологическое обеспечение», 200503.65 «Стандартизация и сертификация» и направлению подготовки магистров 221700.68 и бакалавров 200500.62 «Стандартизация и метрология», а также для студентов других технических специальностей и направлений подготовки, изучающих метрологию в составе общепрофессиональных дисциплин. Учебник может быть полезен сотрудникам государственной метрологической службы и работникам метрологических служб государственных органов управления Российской Федерации и юридических лиц, ученым и специалистам на производстве, занимающимся измерениями.

Рекомендован Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Метрология, стандартизация и сертификация» и специальностям «Метрология и метрологическое обеспечение», «Стандартизация и сертификация».

ББК 30.10я7
УДК 006.91(075)

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-5-459-00910-1

© ООО Издательство «Питер», 2012

Содержание

Глава 1. Средства измерений	5
1.1. Классификация средств измерений	5
1.2. Метрологические характеристики средств измерений	7
1.3. Нормирование метрологических характеристик средств измерений	9
1.4. Метрологическая надежность средств измерений	14
Глава 2. Режимы работы средств измерений	21
2.1. Установившийся режим	21
2.2. Переходный режим	23
2.2.1. Классический метод решения уравнения динамики	25
2.2.2. Операторный метод решения уравнения динамики	27
2.2.3. Спектральный метод решения уравнения динамики	33
2.2.4. Обратная задача динамики	34
2.2.5. Типовые динамические звенья	39
2.2.6. Теорема разложения	45
2.3. Стационарный режим	47
2.4. Нестационарный режим	48
2.5. Статические и динамические измерения	51
2.6. Оптимальная фильтрация	63
2.7. Передача измерительной информации по каналам связи (основы телеметрии)	67
2.7.1. Формы представления измерительной информации в измерительных системах	67
2.7.2. Кодирование	72
2.7.3. Модуляция	79
2.7.4. Согласование сигнала с каналом	91
2.7.5. Детектирование	97
2.7.6. Декодирование и восстановление сигнала	100
2.8. Пространственная селекция	105
2.8.1. Пеленгование	106
2.8.2. Измерение расстояния	117
2.8.3. Измерение скорости	122
2.8.4. Основы теории локационных систем	124
Глава 3. Метрологическое обслуживание средств измерений	131
3.1. Область применения средств измерений	131
3.2. Испытания средств измерений	132

3.3. Калибровка средств измерений	134
3.4. Поверка средств измерений	141
Глава 4. Передача информации о размерах единиц	147
4.1. Локальные схемы передачи информации о размерах единиц	147
4.2. Государственные схемы передачи информации о размерах единиц	152
4.3. Прослеживаемость эталонов и средств измерений	155
Глава 5. Эталоны	159
5.1. Классификация эталонов	159
5.2. Государственные эталоны основных единиц	161
5.2.1. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени	161
5.2.2. Государственный первичный эталон единицы длины	164
5.2.3. Государственный первичный эталон единицы массы	165
5.2.4. Государственный первичный эталон единицы силы света	167
5.2.5. Государственный первичный эталон единицы силы постоянного электрического тока	169
5.2.6. Международная температурная шкала МТШ-90	170
5.3. Государственные первичные эталоны производных единиц	172
Глава 6. Единство измерений.	175
6.1. Основы обеспечения единства измерений.	175
6.2. Техническая основа обеспечения единства измерений	176
6.2.1. Централизованное воспроизведение единиц	176
6.2.2. Квантовая метрология	179
6.2.3. Децентрализованное воспроизведение единиц	186
6.3. Методическая основа обеспечения единства измерений.	194
6.3.1. Методики измерений.	194
6.3.2. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений.	204
6.3.3. Документы на методики поверки средств измерений	210
6.4. Нормативно-правовая основа обеспечения единства измерений	213
6.4.1. Законодательная метрология	213
6.4.2. Международная система единиц	215
6.5. Организационная основа обеспечения единства измерений.	228
6.5.1. Государственные службы обеспечения единства измерений	228
6.5.2. Метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц.	230
Глоссарий	232
Библиографический список	235
Предметный указатель	236

Глава 1

Средства измерений

1.1. Классификация средств измерений

Так как измеряются свойства, общие в качественном отношении многим объектам или явлениям, то эти свойства в чем-то должны проявляться, как-то должны обнаруживаться. Технические устройства, предназначенные для обнаружения (индикации) физических свойств, называются *индикаторами* (см. ч. I, п. 5.1). Стрелка магнитного компаса, например, — индикатор напряженности магнитного поля; осветительная электрическая лампочка — индикатор электрического напряжения в сети; лакмусовая бумага — индикатор активности ионов водорода в растворах.

С помощью индикаторов устанавливается наличие измеряемой физической величины и может регистрироваться изменение ее размера. В этом отношении индикаторы играют ту же роль, что и органы чувств человека, но значительно расширяют их возможности. Человек, например, слышит в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц, в то время как техническими средствами обнаруживаются звуковые колебания в диапазоне от инфранизких (доли герца) до ультравысоких (десятки и сотни килогерц) частот. Видят люди в узком оптическом диапазоне электромагнитных волн, а инструментально регистрируются электромагнитные колебания от сверхнизкочастотных радиоволн с частотой, составляющей доли герца, до жесткого гамма-излучения с частотой порядка 10^{22} Гц. В то же время не создано еще технических устройств, которые могли бы соперничать с обонянием человека или животных.

Так как индикаторы должны обнаруживать проявление свойств окружающего мира, важнейшей их технической характеристикой является *порог обнаружения* (иногда его называют *порогом чувствительности*). Чем меньше порог обнаружения, тем более слабое проявление свойства регистрируется индикатором. Современные индикаторы обладают очень низкими порогами обнаружения, лежащими на уровне фоновых помех и собственных шумов аппаратуры. Последние имеют тепловую природу, поэтому для их снижения чувствительные элементы и электронные узлы особо чувствительных индикаторов охлаждают до температуры, близкой к абсолютному нулю. Селекцию (выделение) сигналов на фоне помех осуществляют с помощью специальных фильтров и накопителей. За счет этих и некоторых других мер порог чувствительности радиотелескопов, например, в сантиметровом диапазоне радиоволн доведен до 10–18 Вт.

Индикаторы являются средствами измерений по шкале порядка. Для измерения по шкале отношений необходимо сравнить неизвестный размер с известным и выразить первый через второй в кратном или дольном отношении. Если физическая величина известного размера есть в наличии, то она непосредственно используется для сравнения. Так, длину измеряют линейкой, плоский угол — транспортиром, массу — с помощью гирь и весов, электрическое сопротивление — с помощью магазина сопротивлений. Если же физической величины известного размера в наличии нет, то сравнивается реакция (отклик) прибора на воздействие измеряемой величины с проявившейся ранее реакцией на воздействие той же величины, но известного размера. Так измеряют: силу электрического тока — амперметром, электрическое напряжение — вольтметром, скорость — спидометром, давление — манометром, термодинамическую температуру — термометром и т. д. При этом предполагается, что соотношение между откликами такое же, как и между сравниваемыми размерами. Для облегчения сравнения отклик на известное воздействие еще на стадии изготовления прибора фиксируют на шкале отсчетного устройства в выбранных единицах измерений, после чего разбивают шкалу на деления в кратном и дольном отношении. Эта процедура называется *градуировкой* (см. ч. I, п. 4.4). При измерениях она позволяет по положению указателя получать результат сравнения непосредственно на шкале отношений.

Все технические средства, предназначенные для измерений, называются *средствами измерений*. Кроме индикаторов к ним относятся вещественные меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы, технические системы и устройства с измерительными функциями, стандартные образцы.

Вещественные меры предназначены для воспроизведения физической величины заданного размера, который характеризуется так называемым *номинальным значением*. При условии что указывается точность, с которой воспроизводится номинальное значение физической величины, гиря является мерой массы, конденсатор — мерой емкости, кварцевый генератор — мерой частоты электрических колебаний и т. д. Различают *однозначные* и *многозначные меры*, а также *наборы мер*. Например, гиря и измерительный конденсатор постоянной емкости — это однозначные меры, измерительная линейка и конденсатор переменной емкости — многозначные меры, а набор гирь и набор измерительных конденсаторов являются наборами мер. Измерения методом сравнения с мерой выполняют с помощью специальных технических устройств — *компараторов*. Компараторами служат равноплечие весы, измерительный мост и т. д. Иногда в качестве компаратора выступает человек.

Измерительные преобразователи — это средства измерений, перерабатывающие измерительную информацию в форму, удобную для дальнейшего преобразования, передачи, хранения, обработки, но, как правило, недоступную для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные преобразователи получили очень широкое распространение. К ним относятся термопары, измерительные усилители, преобразователи давления и многие другие виды измерительных устройств. По месту, занимаемому в измерительной цепи, они делятся на *первичные* и *промежуточные* (рис. 1).



Рис. 1. Измерительная цепь: 1 — первичный измерительный преобразователь с чувствительным элементом 2; 3 — промежуточные измерительные преобразователи

Конструктивно преобразователи являются либо отдельными блоками, либо составными частями средств измерений. Если преобразователи не входят в измерительную цепь, то они не относятся к измерительным. Таковы, например, операционный усилитель, делитель напряжения в цепи электропитания, силовой трансформатор и т. п.

Измерительный прибор представляет собой совокупность измерительных преобразователей, образующих измерительную цепь, и *отсчетного устройства*. В отличие от вещественной меры, прибор не воспроизводит известное значение физической величины. Измеряемая величина должна подводиться к нему и воздействовать на его первичный измерительный преобразователь.

Измерительные установки состоят из функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, собранных в одном месте. В *измерительных системах* эти средства и устройства территориально разобщены и соединены каналами связи. Область науки и техники, включающая вопросы получения измерительной информации и передачи ее по каналам связи, называется *телеметрией*. И в установках, и в системах измерительная информация может быть представлена в форме, удобной как для непосредственного восприятия, так и для автоматической обработки, передачи и использования в автоматизированных системах управления. *Технические системы и устройства с измерительными функциями* наряду с их основными функциями, не имеющими отношения к измерениям, выполняют еще и измерительные функции.

Стандартные образцы — образцы веществ (материалов) с установленными по результатам испытаний значениями одной и более величин, характеризующих состав или свойство этого вещества (материала).

Человек не является техническим средством, но его тоже можно отнести к средствам измерений. Первичными измерительными преобразователями у него служат органы чувств (зрения, слуха, обоняния, осязания и вкуса). Измерения, выполняемые с помощью органов чувств человека, называются *органолептическими*. Они относятся к обширному классу *экспертных измерений*, или *измерений экспертными методами*.

1.2. Метрологические характеристики средств измерений

Качество измерений зависит от многих факторов (см. ч. I, п. 4.1). В некоторых случаях, однако, требуется знать, какое влияние на результаты измерений и их точность оказывают именно средства измерений. К таким случаям относятся:

- априорная оценка точности измерений. При ее выполнении наряду с другими факторами должна учитываться точность средств измерений;

- выбор средств измерений, применение которых в известных условиях обеспечит требуемую точность измерений. Эта задача является обратной по отношению к предыдущей;
- сравнение различных типов средств измерений по их метрологическим свойствам как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации;
- использование средств измерений в качестве комплектующих при разработке сложных измерительных систем. Одни и те же требования к измерительной системе могут удовлетворяться при различных сочетаниях средств измерений, используемых в качестве комплектующих. Оптимальное сочетание должно быть результатом технико-экономического обоснования;
- определение точности информационных систем расчетным путем, когда экспериментальное решение этой задачи связано с большими трудностями или вообще невозможно из-за специфики условий работы. Эта же задача возникает при проектировании информационных систем.

Характеристики свойств средств измерений, оказывающие влияние на результаты измерений и их точность, называются метрологическими характеристиками средств измерений. Они бывают двух видов:

1. Метрологические характеристики, в которых используется информация о размере единицы измерения. К этому виду относятся следующие группы метрологических характеристик:

1.1. *Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений* (до внесения поправок): функция преобразования измерительного преобразователя, а также измерительного прибора с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц входной величины; значение однозначной или значения многозначной меры; цена деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры; цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

1.2. *Характеристики качества показаний* — точности и правильности. Точность показания определяется его средним квадратическим отклонением или его аналогом. Правильность обеспечивается внесением поправки, устанавливаемой при испытаниях средства измерений в целях утверждения типа. Эта поправка является одной из составляющих суммарной поправки, которая вносится в показание средства измерений.

1.3. *Динамические характеристики* средств измерений (*полные и частные*), учитывающие их инерционные свойства в особых условиях, когда измеряемая величина меняется во времени.

2. Метрологические характеристики, в которых не используется информация о размере единицы измерения. К этому виду относятся следующие группы метрологических характеристик:

2.1. *Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений* (до внесения поправок). К ним относятся: вид выходного кода, число разрядов кода, если средство измерений предназначено для выдачи результатов в цифровом коде.

2.2. *Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам.* К ним относятся функции влияния и учета изменений метрологических характеристик средств измерений, вызванных изменениями влияющих величин в установленных пределах.

2.3. *Характеристики взаимодействия с объектами или устройствами на входе и выходе средств измерений.* Примерами характеристик этой группы являются входной и выходной импедансы линейного измерительного преобразователя.

2.4. *Неинформативные параметры выходного сигнала,* обеспечивающие нормальную работу устройств, подключенных к средству измерений. Например, выходным сигналом преобразователя напряжения в среднюю частоту следования импульсов является последовательность импульсов. Для определения значения измеряемого напряжения к выходу преобразователя подключается частотомер. Он будет нормально работать только в случае, если амплитуда и форма импульсов преобразователя, хотя они и не несут информации о значении измеряемого напряжения, удовлетворяют определенным требованиям. В противном случае частотомер будет измерять частоту следования этих импульсов неточно либо вообще не будет работать.

Метрологические характеристики являются показателями качества и технического уровня всех без исключения средств измерений. Они относятся к априорной информации, используемой:

- для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности или неопределенности измерений;
- для расчета метрологических характеристик каналов измерительных систем, состоящих из средств измерений с нормированными метрологическими характеристиками;
- для оптимального выбора средств измерений.

Сведения о них, полученные при испытаниях средств измерений в целях утверждения типа, содержатся в нормативно-технических документах на средства измерений. В этих же документах приводятся требования (*нормы*), которым должны удовлетворять метрологические характеристики всех серийно выпускаемых средств измерений данного типа. Соответствие этим требованиям метрологических характеристик каждого отдельного экземпляра средств измерений должно проверяться.

Проверка соответствия метрологических характеристик нормам и установление на этой основе пригодности средств измерений к применению производится при их поверке (см. п. 3.4).

1.3. Нормирование метрологических характеристик средств измерений

Нормирование метрологических характеристик средств измерений осуществляется двумя способами:

1. Путем установления *номинальной* метрологической характеристики средств измерений данного типа.

2. Путем указания *пределов*, в которых должно находиться значение нормируемой метрологической характеристики.

Типовые метрологические характеристики групп 1.1 и 2.1 нормируют 1-м способом как *номинальные* характеристики всех средств измерений данного типа. Номинальную функцию преобразования измерительного преобразователя представляют в виде формулы, таблицы, графика. Линейную функцию преобразования, проходящую через начало координат, допускается представлять *коэффициентом преобразования* в виде числа. Номинальные значения однозначной или многозначной меры представляют именованными числами.

Для *конкретных экземпляров* средств измерений, предназначенных для применения не с номинальными (распространяющимися на все экземпляры средств измерений данного типа), а с индивидуальными метрологическими характеристиками, полученными, например, в результате калибровки (см. п. 3.3), соответствующие номинальные характеристики можно не нормировать. В этих случаях обычно применяют 2-й способ нормирования и указывают *пределы* (граничные характеристики), в которых должна находиться индивидуальная метрологическая характеристика при предусмотренных условиях применения данного средства измерений.

Нормальные и рабочие условия применения средств измерений устанавливаются в нормативно-технических документах на средства измерений. *Нормальными* считаются условия, при которых зависимостью метрологических характеристик от изменения значений влияющих величин можно пренебречь. Так, для многих типов средств измерений нормальными условиями являются: температура — (293 ± 5) К, относительная влажность — (65 ± 15) %, напряжение в сети питания — $220 \text{ В} \pm 10 \%$. *Рабочие* условия отличаются от нормальных более широким диапазоном изменения значений влияющих величин.

При нормировании метрологических характеристик группы 1.2 исходят из того, что *правильность показаний* средств измерений обеспечивается *поправкой*, точное значение которой для каждого конкретного экземпляра средств измерений неизвестно. Поэтому *устанавливают пределы*, в которых должна находиться *поправка* у всех средств измерений данного типа. Прибегают также к ситуационному моделированию (см. ч. I, п. 1.1) и *нормируют пределы*, в которых должны находиться *аналоги числовых характеристик ситуационной модели*.

Точность показаний нормируется указанием *предельно допустимого значения среднего квадратического отклонения* (или его оценки).

Так как показание и поправка суммируются, то *может нормироваться аналог среднего квадратического отклонения композиции закона распределения вероятности показания и ситуационной модели поправки* (см. ч. I, п. 5.2).

Нормирование метрологических характеристик группы 1.2 может производиться как для нормальных, так и для рабочих условий. Они представляются либо одним числом, либо функцией (формулой, таблицей, графиком) информативного параметра входного или выходного сигнала.

При нормировании метрологических характеристик группы 1.3 устанавливаются *номинальная динамическая характеристика, пределы допускаемых*

отклонений от нее и граничные динамические характеристики. Они представляются в виде числа, формулы, таблицы или графика.

Во всех случаях представление нормированных метрологических характеристик в виде графика допускается только при одновременном представлении их в виде формулы или таблицы.

Динамические характеристики средств измерений нормируются для нормальных или для рабочих условий применения. В отличие от этого метрологические характеристики группы 2.2 нормируются только для рабочих условий измерений. В рабочих условиях изменение значений влияющих величин начинает сказываться на точности и правильности показаний. Это учитывается *функциями влияния*. Для разных экземпляров средств измерений данного типа могут различаться как вид этих функций, так и их параметры. Однако в принципе, для всех экземпляров средств измерений данного типа эти функции должны быть подобны, а их параметры близки. Поэтому *нормируются в качестве номинальных некоторые усредненные функции влияния* с указанием их параметров. *Нормируются также пределы допускаемых отклонений функций влияния* у отдельных экземпляров средств измерений данного типа от номинальной. Если функции влияния у различных экземпляров средств измерений данного типа существенно различаются между собой, то *нормируются граничные функции влияния*.

В нормативно-технических документах номинальная функция влияния, пределы допускаемых отклонений от нее и граничные функции влияния представляются в виде числа, формулы, таблицы или графика. Линейную функцию влияния, проходящую через начало координат, допускается представлять *коэффициентом влияния* в виде числа. Функции влияния представляют в координатах, у которых начало отсчета по оси ординат совпадает с нормальным значением влияющей величины на оси абсцисс.

Пределы допускаемых изменений метрологических характеристик, вызванных изменениями влияющих величин, устанавливают в виде границ зоны вокруг значения метрологической характеристики при нормальных условиях.

Метрологические характеристики группы 2.3 нормируют для нормальных или рабочих условий путем установления номинальных характеристик и пределов допускаемых отклонений от них или граничных характеристик. Неинформативные параметры выходного сигнала средства измерений (группа 2.4) нормируют для рабочих условий путем установления номинальных параметров и пределов допускаемых отклонений от них либо наибольших или наименьших допускаемых значений параметров. Формы представления характеристик, относящихся к группам 2.3 и 2.4, устанавливаются в стандартах на средства измерений конкретных видов или типов.

В зависимости от особенностей использования средств измерений может возникнуть необходимость в том или ином наборе их метрологических характеристик. Так, для вещественных мер и цифроаналоговых преобразователей, аналоговых и цифровых измерительных показывающих и регистрирующих приборов,

аналоговых и аналого-цифровых измерительных преобразователей нормируются разные наборы метрологических характеристик. Поэтому в нормативно-технических документах на средства измерений конкретных видов или типов следует нормировать комплексы метрологических характеристик из числа установленных в ГОСТ 8.009-84(2003) и (или) в необходимых случаях дополнительно включенных, исходя из специфики назначения средств измерений и технико-экономического обоснования. Рациональность комплекса нормированных метрологических характеристик проверяется при испытаниях средств измерений по ПР 50.2.009-94. Эта проверка должна быть включена в программы испытаний.

Использование нормированных метрологических характеристик для определения в реальных условиях эксплуатации точности показаний средств измерений и поправки, обеспечивающей их правильность, рассмотрим на примере.

Пример 1

В нормативно-технической документации на вольтметр приведены следующие его нормированные метрологические характеристики:

1. В нормальных условиях измерений (при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряжении питания 220 В) аддитивная поправка θ_n к показаниям у приборов этого типа находится в пределах от -10 до 10 мВ ; среднее квадратическое отклонение показания σ_n не превышает 5 мВ .

2. Номинальная функция влияния температуры на поправку

$$\Psi_{\theta}(t) = -K_{\theta(t)}(t - t_n);$$

номинальная функция влияния напряжения в сети питания на поправку

$$\Psi_{\theta}(U) = -K_{\theta(U)}(U - U_n),$$

где $t_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $U_n = 220\text{ В}$ — нормальные значения влияющих величин, а номинальные значения коэффициентов влияния температуры и напряжения питания $K_{\theta(t)} = 0,5\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$; $K_{\theta(U)} = 0,4\text{ мВ}/\text{В}$.

3. Номинальная функция влияния температуры на среднее квадратическое отклонение показания

$$\Psi_{\sigma}(t) = -K_{\sigma(t)}(t - t_n);$$

номинальная функция влияния напряжения в сети питания на среднее квадратическое отклонение показания

$$\Psi_{\sigma}(U) = -K_{\sigma(U)}(U - U_n),$$

где $K_{\sigma(t)} = 0,1\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$; $K_{\sigma(U)} = 0,1\text{ мВ}/\text{В}$.

Требуется определить поправку, обеспечивающую правильность показания вольтметра в рабочих условиях измерений:

$$25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$200\text{ В} \leq U \leq 230\text{ В},$$

и точность показания.

Решение. 1. Неопределенность аддитивной поправки θ_n в нормальных условиях учитывается ситуационной моделью, показанной на рис. 2, а. Если не-

определенность рабочих условий измерений также представить с помощью ситуационных моделей, то ситуационные модели номинальных функций влияния на поправку температуры и напряжения питания будут выглядеть так, как это показано на рис. 2, б, в.

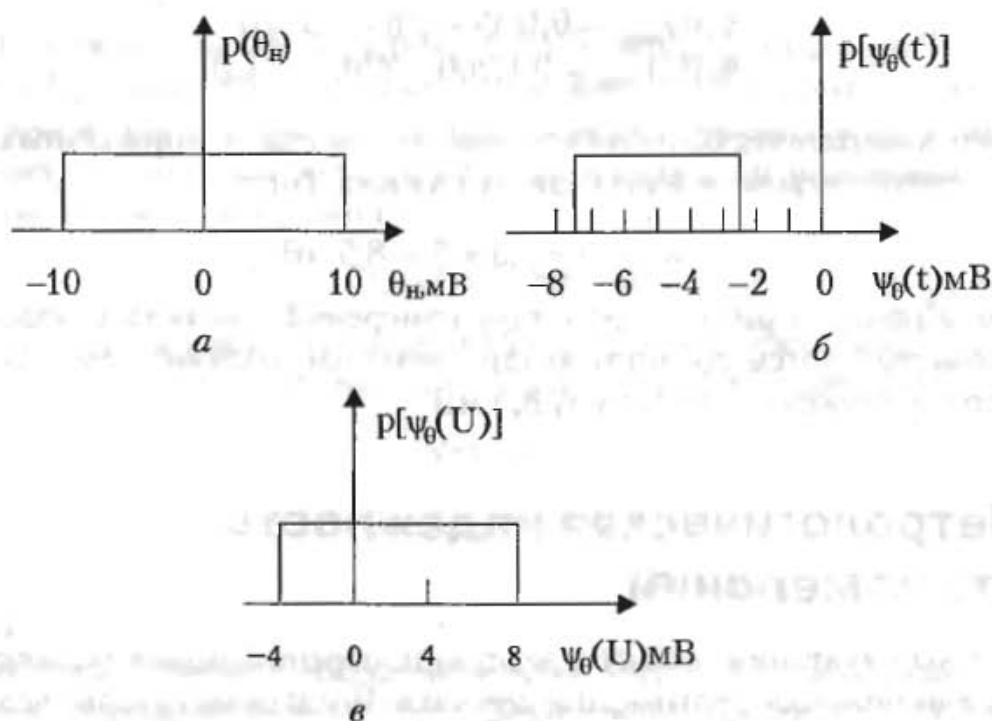


Рис. 2. Ситуационные модели поправки к показанию вольтметра в нормальных условиях (а) и номинальных функций влияния на поправку температуры (б) и напряжения в сети питания (в)

Аналоги числовых характеристик всех трех ситуационных моделей, показанных на рис. 2:

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_n &= 0 \text{ мВ}; u_{\theta_n}^2 = \frac{100}{3} = 33,3 \text{ мВ}^2; \\ \bar{\Psi}_\theta(t) &= -5 \text{ мВ}; u_{\Psi_\theta(t)}^2 = \frac{6,25}{3} = 2,1 \text{ мВ}^2; \\ \bar{\Psi}_\theta(U) &= 2 \text{ мВ}; u_{\Psi_\theta(U)}^2 = \frac{36}{3} = 12 \text{ мВ}^2.\end{aligned}$$

Функции влияния на поправку являются аддитивными добавками к ее значению в нормальных условиях измерений. Поэтому ситуационная модель поправки в рабочих условиях измерений будет композицией ситуационных моделей, показанных на рис. 2. Аналоги ее числовых характеристик:

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_p &= \bar{\theta}_n + \bar{\Psi}_\theta(t) + \bar{\Psi}_\theta(U) = 0 - 5 + 2 = -3 \text{ мВ}; \\ u_{\theta_p}^2 &= u_{\theta_n}^2 + u_{\Psi_\theta(t)}^2 + u_{\Psi_\theta(U)}^2 = 33,3 + 2,1 + 12 = 47,4 \text{ мВ}^2.\end{aligned}$$

Таким образом, для обеспечения в рабочих условиях измерений правильности показания в него нужно вносить поправку -3 мВ; неопределенность его по типу В при этом будет составлять $6,9$ мВ.

2. Точность показания определяется влиянием на σ_n температуры и напряжения в сети питания:

$$\sigma_p = \sigma_n + \Psi_\sigma(t) + \Psi_\sigma(U),$$

поскольку номинальные функции влияния на среднее квадратическое отклонение показания являются аддитивными добавками к его значению в нормальных условиях. Для простоты возьмем максимальные значения номинальных функций влияния

$$\begin{aligned}\Psi_{\sigma}(t)_{\max} &= 0,1(35 - 20) = 1,5 \text{ мВ}; \\ \Psi_{\sigma}(U)_{\max} &= 0,1|200 - 220| = 2 \text{ мВ}\end{aligned}$$

и среднего квадратического отклонения показания в нормальных условиях, что будет соответствовать наихудшему случаю. Тогда

$$\sigma_p = 5 + 1,5 + 2 = 8,5 \text{ мВ}.$$

Таким образом, в рабочих условиях измерений точность показания вольтметра характеризуется средним квадратическим отклонением или стандартной неопределенностью по типу А 8,5 мВ.

1.4. Метрологическая надежность средств измерений

В процессе эксплуатации любого средства измерений может возникнуть неисправность или поломка, называемые *отказом*. Внезапные отказы, вследствие их случайности, невозможно прогнозировать. Для большого числа серийно выпускаемых электрических и радиотехнических элементов средств измерений (транзисторов, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и т. д.) имеются специальные таблицы, в которых указывается *интенсивность λ их отказов* — количество отказов в единицу времени.

Если справочные данные отсутствуют, то их можно получить экспериментально в результате испытания элементов на надежность. Для этого N однотипным элементам задаются обычные режимы их работы и фиксируется число отказов l за определенный промежуток времени Δt . Интенсивность отказа элемента вычисляется в этом случае по формуле:

$$\lambda = \frac{l}{N \cdot \Delta t}.$$

Зная интенсивность отказов каждого элемента λ_i , можно определить интенсивность отказов средства измерений, состоящего из этих элементов:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i,$$

где n — количество типов элементов, входящих в состав средства измерений; m_i — количество элементов i -го типа.

Вероятность безотказной работы средства измерений

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt},$$

а среднее время безотказной работы, называемое *наработкой на отказ*,

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Интенсивность отказов λ_{Σ} , вероятность безотказной работы $P(t)$ и наработка на отказ $T_{\text{ср}}$ называются *показателями надежности* средств измерений. Так как случайный отказ может произойти в любой момент независимо от того, сколько времени проработало средство измерений, то интенсивность внезапных отказов от времени не зависит:

$$\lambda_{\Sigma}(t) = \lambda_{\Sigma} = \text{const.}$$

Поэтому, когда речь идет о внезапных отказах, вероятность безотказной работы и наработка на отказ определяются более простыми выражениями:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t};$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}.$$

Пример 2

Электроизмерительный преобразователь состоит из четырех транзисторов с интенсивностью отказов $\lambda_T = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, восьми резисторов с $\lambda_p = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ и шести керамических сопротивлений с $\lambda_c = 3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Определить вероятность внезапного отказа этого средства измерений за 1000 ч работы.

Решение

1. Интенсивность отказов электроизмерительного преобразователя

$$\lambda_{\Sigma} = 4 \cdot 10^{-7} + 8 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$$

2. Вероятность безотказной работы за 1000 ч

$$P(1000 \text{ ч}) = e^{-0,1} = 0,9.$$

3. Вероятность отказа за это же время

$$P_{\text{отк}}(1000 \text{ ч}) = 1 - P(1000 \text{ ч}) = 0,1.$$

По характеру своего проявления внезапные отказы являются *явными*. Они сравнительно легко обнаруживаются и после выяснения их причин возникшие неисправности устраняются. Сложнее обстоит дело с диагностикой так называемых постепенных отказов, которые заключаются в том, что с течением времени метрологические характеристики перестают соответствовать установленным для них нормам, и средство измерений, вследствие этого, становится непригодным для применения по назначению. Такие отказы являются *скрытыми* и могут быть обнаружены только при очередной поверке средства измерений (см. п. 3.4). Поэтому межповерочные интервалы устанавливаются, исходя из требования обеспечения *метрологической надежности* средств измерений.

Метрологическая надежность — это свойство средств измерений сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение определен-

ного времени при нормальных режимах и рабочих условиях эксплуатации. *Метрологическим отказом* называется выход метрологической характеристики средства измерений за пределы нормы. Метрологические отказы являются результатом старения и износа элементов и узлов средств измерений, так что их интенсивность с течением времени возрастает.

Показатели метрологической надежности средств измерений определяются экспериментально. С этой целью проводятся испытания средств измерений на метрологическую надежность. Для испытаний отбираются N образцов однотипных средств измерений. У каждого образца устанавливается индивидуальное значение Ξ_i исследуемой метрологической характеристики. Затем определяется закон распределения вероятности Ξ и его числовые характеристики. В большинстве случаев закон распределения вероятности Ξ оказывается нормальным с оценками среднего значения и дисперсии:

$$\hat{\Xi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Xi_i; \quad S_{\Xi}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Xi_i - \hat{\Xi})^2.$$

При правильном нормировании среднее арифметическое $\hat{\Xi}$ в пределах точности измерений должно совпадать с номинальным значением Ξ_n этой метрологической характеристики, а пределы Ξ_{\max} и Ξ_{\min} , в которых должны находиться индивидуальные метрологические характеристики любых средств измерений данного типа, обычно устанавливаются симметрично относительно Ξ_n (см. рис. 3). Содержанием испытаний на метрологическую надежность является исследование зависимости $p(\Xi)$ от времени.

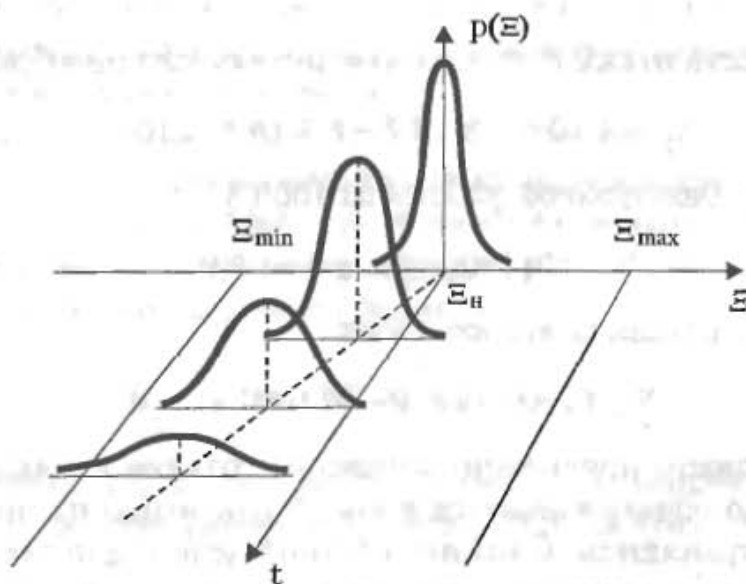


Рис. 3. Зависимость плотности вероятности метрологической характеристики от времени

Предположим, что значение интересующей нас метрологической характеристики является линейной функцией времени:

$$\Xi(t) = \Xi + at,$$

где значение коэффициента a определяется интенсивностью старения и износа элементов и узлов средств измерений. Для каждого из N отобранных на испы-

тания экземпляров средств измерений это значение определяется как изменение индивидуального значения метрологической характеристики за выбранный промежуток времени Δt :

$$a_i = \frac{\Delta \Xi_i}{\Delta t}.$$

Среднее арифметическое значение и оценка дисперсии a рассчитываются обычным способом. Если a подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то

$$p[\Xi(t)] = \frac{1}{S_{\Xi(t)}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\Xi(t) - \hat{\Xi}(t)]^2}{2S_{\Xi(t)}^2}},$$

где

$$\hat{\Xi}(t) = \Xi_n + \hat{a}t; \quad S_{\Xi(t)}^2 = S_{\Xi}^2 + S_a^2 t^2.$$

Трансформация плотности вероятности метрологической характеристики во времени при $\hat{a} < 0$ показана на рис. 3. Согласно зависимости, представленной верхней кривой на рис. 52 в ч. I, с вероятностью 0,997

$$\hat{\Xi}(t) - 3S_{\Xi(t)} \leq \Xi(t) \leq \hat{\Xi}(t) + 3S_{\Xi(t)};$$

с вероятностью 0,99

$$\hat{\Xi}(t) - 2,6S_{\Xi(t)} \leq \Xi(t) \leq \hat{\Xi}(t) + 2,6S_{\Xi(t)};$$

с вероятностью 0,95

$$\hat{\Xi}(t) - 2S_{\Xi(t)} \leq \Xi(t) \leq \hat{\Xi}(t) + 2S_{\Xi(t)}$$

и т. д. Таким образом, вероятность безотказной в метрологическом смысле работы (т. е. вероятность того, что значение метрологической характеристики у средств измерений этого типа не выйдет за установленные пределы), равная 0,997, обеспечивается в течение времени, определяемого в рассматриваемом случае (при $\hat{a} < 0$) из условия:

$$\Xi_n + \hat{a}t - 3S_{\Xi(t)} \geq \Xi_{\min};$$

вероятность безотказной работы, равная 0,99, обеспечивается в течение времени, определяемого из условия:

$$\Xi_n + \hat{a}t - 2,6S_{\Xi(t)} \geq \Xi_{\min};$$

вероятность 0,95 обеспечивается в течение времени, определяемого из условия:

$$\Xi_n + \hat{a}t - 2S_{\Xi(t)} \geq \Xi_{\min},$$

и т. д. Следовательно, задаваясь вероятностью безотказной работы, можно установить время, в течение которого она обеспечивается, и назначить *межповерочный интервал*, который не должен превышать это время.

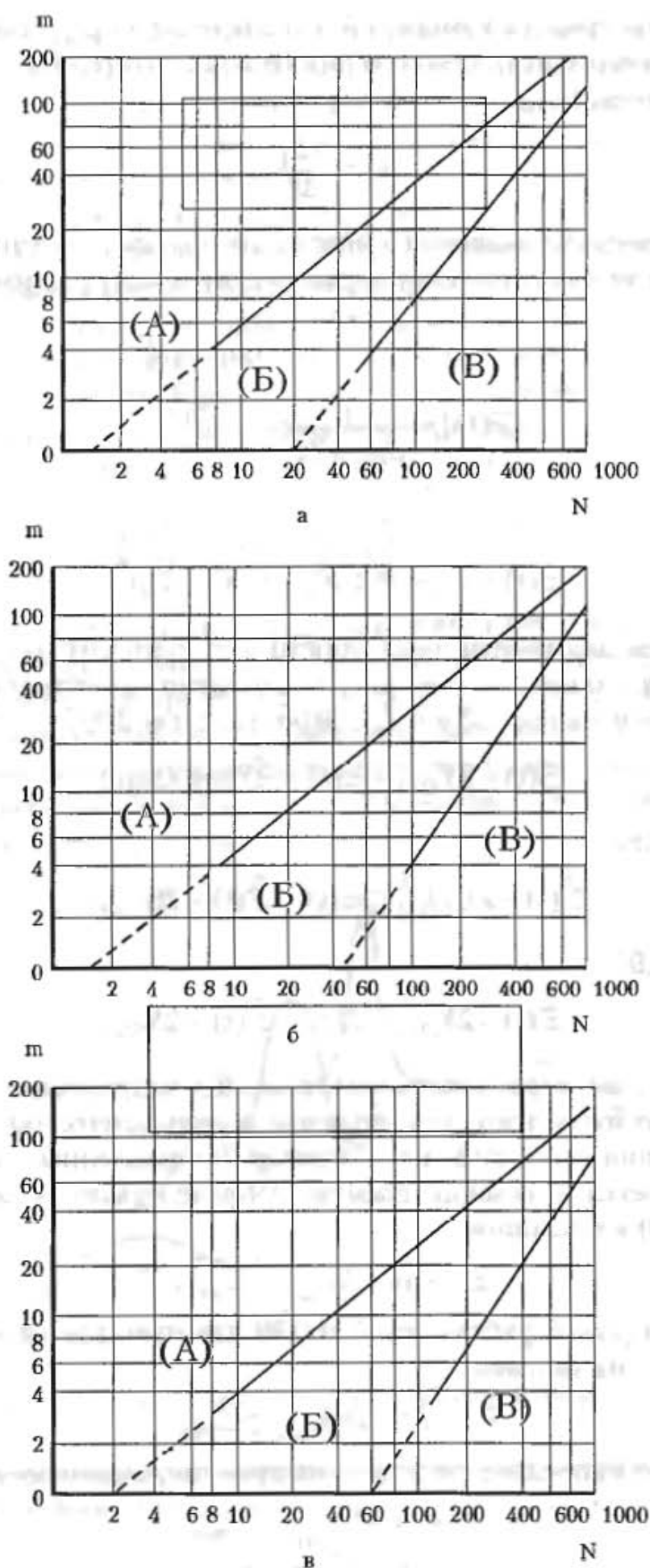


Рис. 4. Графики для определения необходимости корректировки межповерочного интервала: а — $P_{m,отк} = 0,2$; б — $P_{m,отк} = 0,15$; в — $P_{m,отк} = 0,1$

На практике часто пользуются упрощенной методикой. Межповерочный интервал определяют по формуле:

$$T_{\text{МП}} = \frac{\ln(1 - P_{\text{М.ОТК}})}{\ln P_{\text{М}}(t)} t,$$

где $P_{\text{М}}(t)$ — вероятность безотказной в метрологическом смысле работы, а $P_{\text{М.ОТК}}$ — вероятность метрологического отказа за время между поверками, выбираемая из следующих установок:

Для средств измерений, используемых	Значение допустимой вероятности метрологического отказа
при технических измерениях	0,1...0,2
при передаче информации о размере единиц	0,05...0,15
при особо важных, ответственных измерениях	0,01...0,05

В процессе эксплуатации может производиться корректировка межповерочного интервала. Если в партии из N поверенных однотипных средств измерений m штук оказываются забракованными по результатам поверки, то по графикам на рис. 4 определяется необходимость корректировки межповерочного интервала. При попадании точки с координатами (N, m) в область (А) межповерочный интервал следует уменьшить, при попадании в область (Б) — оставить без изменения, при попадании в область (В) — увеличить. Откорректированный межповерочный интервал определяется по формуле:

$$T_{\text{МП}}^* = \frac{\ln(1 - P_{\text{М.ОТК}})}{\ln(1 - P_{\text{М.ОТК}}^*)} T_{\text{МП}}$$

где эмпирическая частота метрологических отказов

$$P_{\text{М.ОТК}}^* = \frac{m}{N} + 2 \sqrt{\frac{m}{N^2} \left(1 - \frac{m}{N}\right)}.$$

При $m = 0$ этой формулой пользоваться нельзя, и для расчетов используется выражение:

$$P_{\text{М.ОТК}}^* = \frac{1}{2(1 + N)}.$$

Пример 3

1. По техническим условиям вероятность безотказной работы прибора, предназначенного для технических измерений, в течение 2000 ч составляет 0,95. Каким должен быть первоначально установленный межповерочный интервал?

Решение. Выбрав в соответствии с приведенными выше рекомендациями $P_{\text{м.отк}} = 0,15$, получим

$$T_{\text{мп}} = \frac{\ln(1-0,15)}{\ln 0,95} \cdot 2000 = 6316 \text{ ч} \approx 9 \text{ мес.}$$

2. По истечении 9 мес. эксплуатации из 85 поверенных приборов два забракованы по результатам поверки. Должен ли быть откорректирован межповерочный интервал?

Решение. По среднему графику на рис. 4 получается, что межповерочный интервал должен быть увеличен. Так как

$$P_{\text{м.отк}}^* = \frac{2}{85} + 2\sqrt{\frac{2}{7225} \left(1 - \frac{2}{85}\right)} = 0,0563,$$

то межповерочный интервал должен быть установлен равным

$$T_{\text{мп}}^* = \frac{\ln(1-0,15)}{\ln(1-0,0563)} \cdot 9 = 25 \text{ мес.}$$

Глава 2

Режимы работы средств измерений

2.1. Установившийся режим

В примерах, показанных в части I на рис. 6–11, указатель отсчетного устройства останавливается на одной из отметок шкалы спустя некоторое время t_y после начала измерения физической величины постоянного размера. У показывающих измерительных приборов это время называется *временем установления показания*, а режим работы средств измерений после установления показания — *установившимся режимом*. В установившемся режиме отметкам шкалы отсчетного устройства соответствуют определенные значения измеряемой величины. Это позволяет связать положение указателя в установившемся режиме с неизвестным значением измеряемой величины.

У измерительных преобразователей реакция на входное воздействие называется *откликом*, или *выходным сигналом*. Это может быть изменение угла поворота стрелки у приборов, показанных на рис. 6–11 в части I, изменение длины столба термометрической жидкости (в примере, показанном на рис. 5), перемещение стрелочного указателя динамометра (в примере на рис. 6) и т. п. Время установления выходного сигнала называется *временем реакции* средства измерений. Зависимость между входным воздействием и откликом на него измерительного преобразователя, а также измерительного прибора с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц входной величины, называется *функцией преобразования*. В установившемся режиме функция преобразования представляет собой линейное (например, $X = aQ$ — см. рис. 7, а) или нелинейное (например, $X = aQ^2$ — см. рис. 7, б или $X = a \lg Q$ — рис. 7, в) алгебраическое уравнение статики.

Как отмечалось в п. п. 1.2, 1.3, функция преобразования является нормируемой метрологической характеристикой. Установленная для всех средств измерений данного типа, она называется *номинальной*. Конкретный экземпляр средства измерений имеет *индивидуальную* функцию преобразования, несколько отличающуюся от номинальной. Поэтому в нормативно-технических документах на

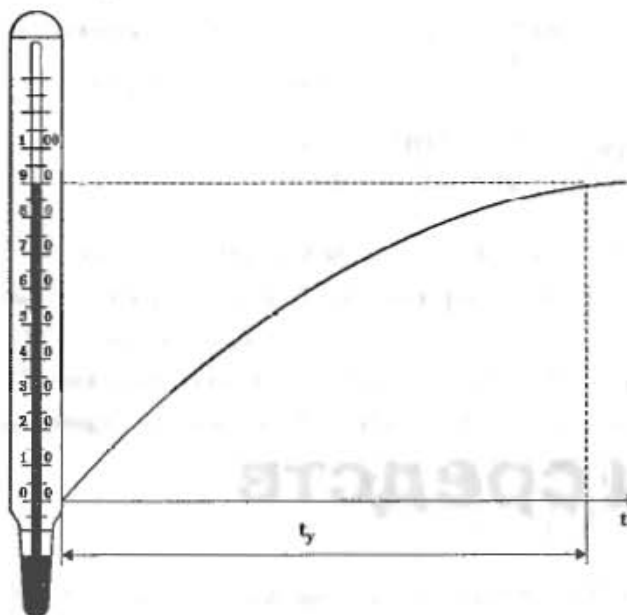


Рис. 5. Процесс установления показания при измерении температуры термометром

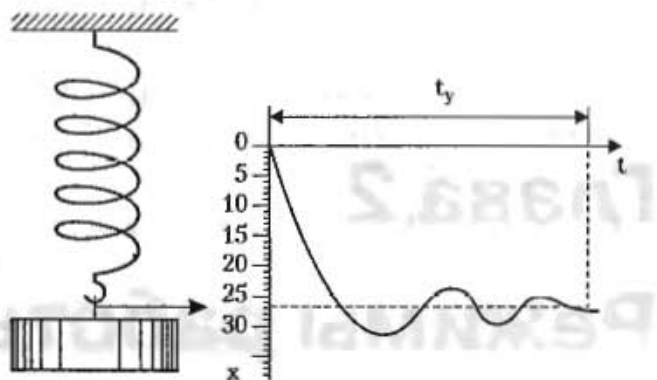


Рис. 6. Процесс установления показания при взвешивании груза динамометром

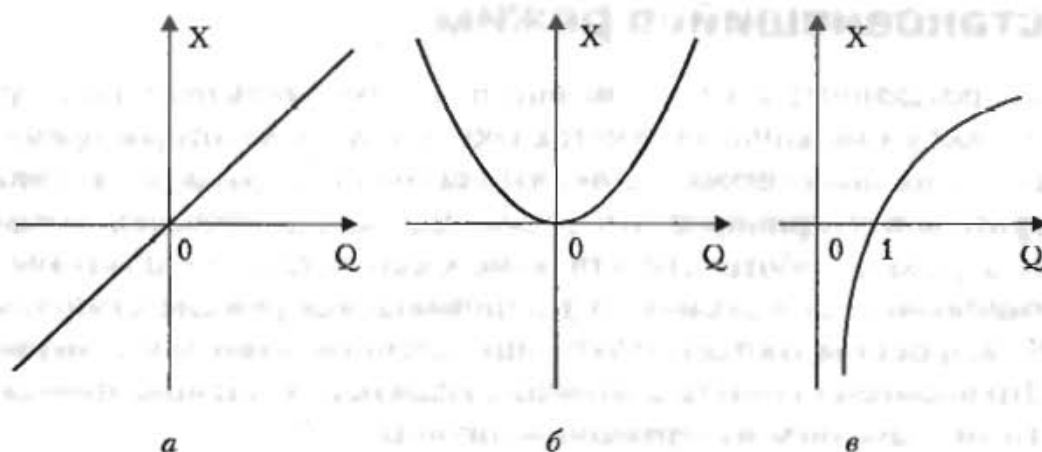


Рис. 7. Линейная (а) и нелинейные (квадратичная — б и логарифмическая — в) функции преобразования в установившемся режиме

средства измерений нормируются пределы, в которых находится их индивидуальная функция преобразования. Линейную функцию преобразования, проходящую через начало координат, допускается представлять коэффициентом преобразования в виде числа. В этом случае нормируются пределы, в которых находится его значение.

Пример 4

Номинальная функция преобразования измерительного преобразователя в установившемся режиме представлена на рис. 7, а. Коэффициент преобразования a_i у отдельных экземпляров средств измерений этого типа не отличается от номинального больше, чем на 1%. Что можно сказать о классе точности таких средств измерений?

Решение. Выражения для номинальной и индивидуальной функций преобразования имеют, соответственно, вид:

$$\begin{aligned} X &= aQ; \\ X_i &= a_i Q. \end{aligned}$$

Вычитая первое уравнение из второго, получим:

$$X_i - X = (a_i - a)Q,$$

откуда

$$\frac{X_i - X}{X} = \frac{a_i - a}{a}.$$

По условию это отношение может достигать 0,01. Следовательно, класс точности таких измерительных преобразователей не может быть выше $\textcircled{1.0}$.

Сведения о функции преобразования, содержащиеся в нормативно-технических документах, предназначены для использования в случаях, когда к точности измерений не предъявляется высоких требований. В противном случае может возникнуть необходимость уточнения индивидуальной функции преобразования конкретного экземпляра средств измерений. Процедура экспериментального определения функции преобразования отдельного средства измерений в установившемся режиме называется *градуировкой*. Она рассмотрена в п. 4.4 части I.

2.2. Переходный режим

При $t < t_y$ (см. рис. 5, 6) режим работы средства измерений называется *переходным*. В этом режиме сказываются инерционные свойства средства измерений. Оно не успевает должным образом отреагировать на изменение входного воздействия $Q(t)$, в результате чего выходной сигнал оказывается искаженным по сравнению с входным. В переходном режиме отклик средства измерений $X(t)$ не соответствует значению измеряемой величины, установленному при градуировке шкалы.

Переходный режим работы средства измерений описывается линейным или нелинейным дифференциальным уравнением динамики.

Пример 5

Чувствительный элемент термометра, показанного на рис. 5, резко опускается в среду с постоянной температурой T_{cp} . Полагая, что передача тепла к чувствительному элементу осуществляется с задержкой τ во времени, а изменение длины столба термометрической жидкости пропорционально изменению температуры, составить уравнение, описывающее переходный режим работы термометра.

Решение. Уравнение теплового баланса в рассматриваемом случае записывается следующим образом:

$$\alpha S [T_{cp} \cdot 1(t - \tau) - T] dt = c \cdot dT.$$

Левая часть этого уравнения представляет собой количество тепла, переданного средой чувствительному элементу за время dt . Здесь α — коэффициент теплопередачи; S — площадь наружной поверхности чувствительного элемента, находящейся в контакте со средой; $T_{cp} \cdot 1(t - \tau)$ — скачок температуры, подводимой к термометрической жидкости чувствительного элемента

через время τ после его погружения в среду с температурой T_{cp} ; T — температура термометрической жидкости. В правой части уравнения — количество тепла, полученного за то же время термометрической жидкостью с теплоемкостью c .

Обозначая через $\epsilon = \frac{c}{\alpha S}$ постоянную времени термометра, называемую также постоянной термической инерции, получим

$$\epsilon \frac{dT}{dt} + T = T_{cp} \cdot 1(t - \tau).$$

Пример 6

Груз, подвешенный к сжатой пружине динамометра, резко отпускается (см. рис. 6). Составить уравнение динамики, описывающее переходный режим работы динамометра.

Решение. Согласно второму закону Ньютона

$$mg \cdot 1(t) - kX - \vartheta \frac{dX}{dt} = m \frac{d^2X}{dt^2},$$

где равнодействующая сил, приложенных к грузу, складывается из силы тяжести, силы сжатия пружины (k — коэффициент жесткости пружины) и силы сопротивления среды (ϑ — коэффициент сопротивления среды). Вводя обозначения $\frac{k}{m} = \omega_0^2$; $\frac{\vartheta}{m} = 2\delta$, получим:

$$\frac{d^2X}{dt^2} + 2\delta \frac{dX}{dt} + \omega_0^2 X = g \cdot 1(t).$$

Пример 7

Составить уравнение динамики, описывающее переходный режим работы интегрирующего звена (рис. 8), входящего в состав измерительной цепи, при подаче на его вход постоянного напряжения U_0 .

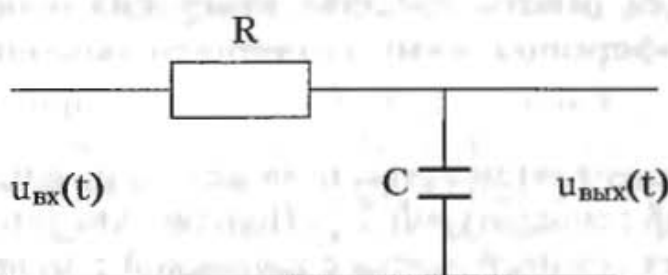


Рис. 8. Интегрирующее звено

Решение. Согласно второму закону Кирхгофа

$$u_R + u_C = u_{вх}(t),$$

где u_R и u_C — падения напряжения соответственно на сопротивлении и конденсаторе, причем

$$u_C = u_{вых}(t); u_{вх}(t) = U_0 \cdot 1(t).$$

Так как ток в цепи $i = C \frac{du_C}{dt}$, то $u_R = iR = RC \frac{du_C}{dt}$. Отсюда

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U_0 \cdot 1(t),$$

или окончательно

$$\frac{du_{\text{вых}}}{dt} + \frac{1}{RC} u_{\text{вых}} = \frac{1}{RC} U_0 1(t).$$

В общем случае у линейных средств измерений уравнение динамики является неоднородным линейным дифференциальным уравнением n -го порядка с постоянными коэффициентами:

$$a_n \frac{d^n X}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} X}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dX}{dt} + a_0 X = Q(t), \quad (1)$$

где $Q(t)$ — известное входное воздействие, называемое также *входным сигналом*, вызывающим отклик на него средства измерения $X(t)$ — *выходной сигнал*.

Уравнение динамики относится к динамическим характеристикам средств измерений. Все способы решения уравнения (1) основаны на его алгебраизации, т. е. на преобразовании этого дифференциального уравнения в алгебраическое.

2.2.1. Классический метод решения уравнения динамики

Решением X неоднородного уравнения (1) является сумма общего решения X_0 однородного уравнения

$$a_n \frac{d^n X}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} X}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dX}{dt} + a_0 X = 0 \quad (2)$$

и частного решения $X_ч$ неоднородного уравнения (1):

$$X = X_0 + X_ч.$$

Для решения однородного уравнения (2) используется его алгебраизация, основанная на свойстве дифференцирования экспоненциальной функции. При $X = e^{rt}$ уравнение (2) принимает вид:

$$(a_n r^n + a_{n-1} r^{n-1} + \dots + a_1 r + a_0) e^{rt} = 0.$$

Это равенство удовлетворяется, если

$$a_n r^n + a_{n-1} r^{n-1} + \dots + a_1 r + a_0 = 0, \quad (3)$$

т. е. задача сводится к отысканию корней алгебраического уравнения (3), которое называется *характеристическим*.

- Если все корни $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n$ характеристического уравнения разные, то каждому из них соответствует решение $X_i = e^{r_i t}$ однородного уравнения (2). Общее решение в этом случае

$$X_0 = b_1 e^{r_1 t} + b_2 e^{r_2 t} + \dots + b_n e^{r_n t},$$

где коэффициенты b_1, b_2, \dots, b_n — произвольные постоянные.

- Если какой-нибудь корень характеристического уравнения r_i является корнем k -й кратности, то

$$X_{i+1} = t e^{r_i t}; X_{i+2} = t^2 e^{r_i t}; \dots X_{i+k-1} = t^{k-1} e^{r_i t}$$

тоже служат решениями однородного уравнения (2). Общим решением уравнения (2) в этом случае является линейная комбинация

$$X_0 = b_1 e^{r_1 t} + b_2 e^{r_2 t} + \dots + (b_i + b_{i+1} \cdot t + \dots + b_{i+k-1} t^{k-1}) e^{r_i t}.$$

- Наконец, если среди корней есть комплексные (они могут быть только попарно сопряженными при действительных коэффициентах a_i), например, если $r_1 = \alpha + j\beta$; $r_2 = \alpha - j\beta$, то в соответствующих членах общего решения функции $e^{r_1 t}$ и $e^{r_2 t}$ должны быть заменены на $e^{\alpha t} \cos \beta t$ и $e^{\alpha t} \sin \beta t$. Получающиеся при этом выражения вида $b_1 \cos \beta t + b_2 \sin \beta t$ могут быть представлены в виде $A \cos(\beta t + \varphi)$.

Частное решение уравнения (1) зависит от вида функции $Q(t)$.

Пример 8

Решить уравнение динамики, составленное в предыдущем примере.

Решение. Характеристическое уравнение, соответствующее однородному уравнению

$$\frac{du_{\text{вых}}}{dt} + \frac{1}{RC} u_{\text{вых}} = 0,$$

имеет вид $r + \frac{1}{RC} = 0$. Единственный корень этого уравнения $r = -\frac{1}{RC}$, поэтому общее решение однородного уравнения $u_{\text{вых}} = b e^{-\frac{t}{RC}}$.

Частное решение неоднородного уравнения динамики, составленного в предыдущем примере, найдем исходя из того, что при $t \rightarrow \infty$ оно должно соответствовать установившемуся режиму. В установившемся режиме конденсатор окажется заряженным до напряжения U_0 , т.е. при $t \rightarrow \infty$

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вых}_0} + u_{\text{вых}_q} = b e^{-\frac{t}{RC}} + u_{\text{вых}_q} \rightarrow u_{\text{вых}_q} = U_0.$$

Таким образом,

$$u_{\text{вых}} = U_0 + b e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Постоянная интегрирования b находится из начальных условий. Так как энергия, запасенная в конденсаторе, не может в момент времени $t = 0$ изме-

ниться скачком от 0 до $\frac{Cu_c^2}{2}$, $u_{\text{вых}}$ будет плавно нарастать от 0 до U_0 . Это возможно только при $b = -U_0$. Поэтому окончательно

$$u_{\text{вых}} = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

График полученной зависимости представлен на рис. 9.

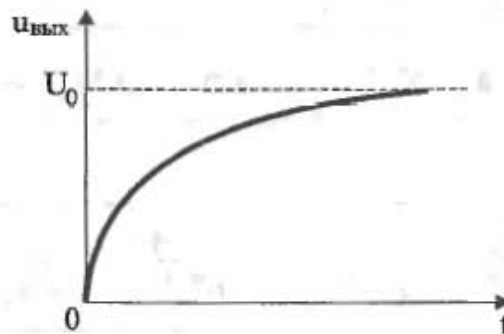


Рис. 9. График зависимости $u_{\text{вых}} = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$

2.2.2. Операторный метод решения уравнения динамики

При сложных функциях $Q(t)$ отыскание частного решения уравнения (1) превращается в проблему. В этих случаях пользуются операторным методом решения уравнения динамики.

Идея операторного метода, предложенного в конце XIX века английским инженером Хевисайдом для расчета переходных процессов в электрических цепях, состоит в алгебраизации уравнения динамики, которая достигается путем перехода от временных зависимостей к зависимостям от комплексного параметра $p = \alpha + j\omega$ посредством интегрального преобразования Лапласа:

$$\begin{aligned} X(p) &= \int_0^{\infty} X(t)e^{-pt} dt; \\ Q(p) &= \int_0^{\infty} Q(t)e^{-pt} dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где $X(p)$ и $Q(p)$ называются *изображениями* $X(t)$ и $Q(t)$, а $X(t)$ и $Q(t)$ — *оригиналами* $X(p)$ и $Q(p)$. Сама же операция (4) представляет собой *прямое преобразование Лапласа* и обозначается

$$\begin{aligned} L[X(t)] &= X(p); \\ L[Q(t)] &= Q(p). \end{aligned}$$

Изображение первой производной

$$L[X'(t)] = \int_0^{\infty} X'(t)e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} e^{-pt} dX(t).$$

Интегрирование по частям дает:

$$L[X'(t)] = X(t)e^{-pt} \Big|_0^{\infty} + p \int_0^{\infty} X(t)e^{-pt} dt = -X(0) + pX(p).$$

Аналогично можно показать, что

$$L[X''(t)] = p^2 X(p) - pX(0) - X'(0);$$

$$L[X^{(n)}(t)] = p^n X(p) - p^{n-1} X(0) - p^{n-2} X'(0) - \dots - X^{(n-1)}(0).$$

С учетом этих соотношений дифференциальное уравнение динамики (1) при нулевых начальных условиях преобразуется в алгебраическое:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) X(p) = Q(p).$$

Отношение

$$W(p) = \frac{X(p)}{Q(p)} = \frac{1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \quad (5)$$

называется *передаточной функцией*. Передаточная функция относится к числу нормируемых динамических характеристик. Как и уравнение (1), она характеризует инерционные свойства средства измерений и может использоваться для изучения переходного режима его работы.

Зная передаточную функцию $W(p)$ и изображение входного воздействия на средство измерений $Q(p)$, можно по формуле

$$X(p) = W(p) \cdot Q(p)$$

найти изображение отклика средства измерений на это входное воздействие, после чего, применив обратное преобразование Лапласа

$$X(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\alpha-j\infty}^{\alpha+j\infty} X(p) e^{pt} dp,$$

обозначаемое

$$L^{-1}[X(p)] = X(t),$$

перейти к оригиналу $X(t)$, т. е. найти сам отклик.

Пример 9

Решить уравнение динамики, составленное в примере 5, операторным методом.

Решение¹

1. Применяя преобразование Лапласа к левой и правой частям уравнения, перейдем к его алгебраической форме:

$$\epsilon p T(p) + T(p) = T_{cp} \frac{e^{-Tp}}{p}.$$

¹ При решении задач операторным методом удобно пользоваться табл. 1.

Таблица 1

График $Q(t)$	Оригинал	Изображение
	$A \cdot \delta(t)$	A
	$\delta(t)$	1
	$1(t)$	$\frac{1}{p}$
	$A \cdot 1(t)$	$\frac{A}{p}$
	$A \cdot 1(t)t$ $A = \operatorname{tg} \varphi$	$\frac{A}{p^2}$
	$A \cdot 1(t - \tau)$	$\frac{A}{p} e^{-\tau p}$
	$A \cdot 1(t - a) - A \cdot 1(t - b)$	$\frac{A}{p} (e^{-ap} - e^{-bp})$
	$A \cdot 1(t - \tau)(t - \tau)$ $A = \operatorname{tg} \varphi$	$\frac{A}{p^2} e^{-\tau p}$

Таблица 1 (продолжение)

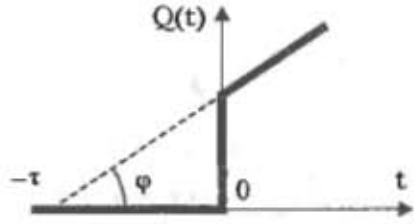
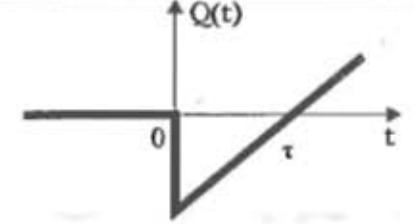
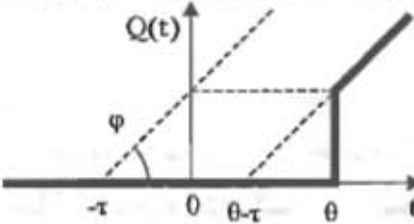
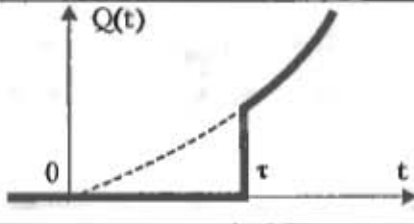
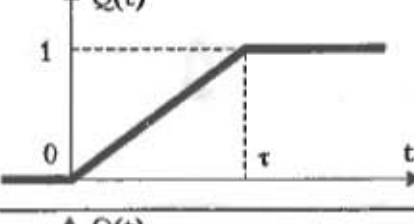
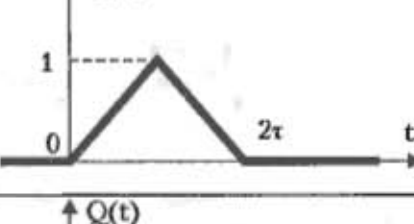
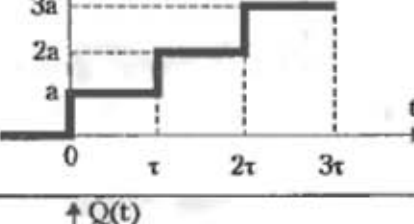
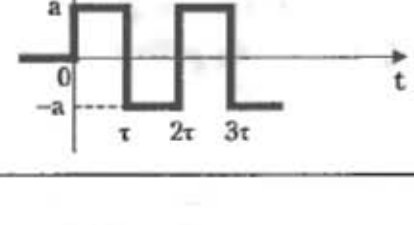
График $Q(t)$	Оригинал	Изображение
	$A \cdot 1(t)(t + \tau)$ $A = \operatorname{tg} \varphi$	$A \left(\frac{1}{p^2} + \frac{\tau}{p} \right)$
	$A \cdot 1(t)(t - \tau)$ $A = \operatorname{tg} \varphi$	$A \left(\frac{1}{p^2} - \frac{\tau}{p} \right)$
	$A \cdot 1(t - \theta)(t + \tau - \theta)$ $A = \operatorname{tg} \varphi$	$A \left(\frac{1}{p^2} + \frac{\tau}{p} \right) e^{-p\theta}$
	$1(t - \tau)t^2$	$\left(\frac{1}{p^3} + \frac{2\tau}{p^2} + \frac{\tau^2}{p} \right) e^{-p\tau}$
	$\frac{t}{\tau}$ при $0 < t < \tau$ 1 при $\tau < t < \infty$	$\frac{1 - e^{-p\tau}}{\tau p^2}$
	$\frac{t}{\tau}$ при $0 < t < \tau$ $2 - \frac{t}{\tau}$ при $\tau < t < 2\tau$ 0 при $2\tau < t < \infty$	$\frac{(1 - e^{-p\tau})^2}{\tau p^2}$
	$a \sum_{k=0}^{\infty} 1(t - k\tau)$	$\frac{a}{p} \frac{1}{1 - e^{-p\tau}}$
	$a \cdot 1(t) + 2a \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k 1(t - k\tau)$	$\frac{a}{p} \operatorname{th} \frac{p\tau}{2}$

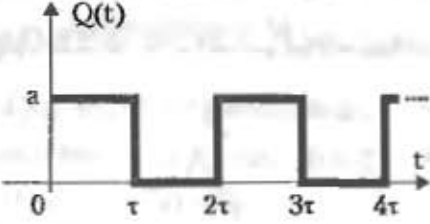
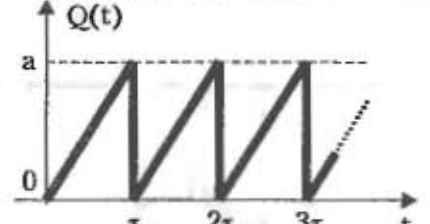
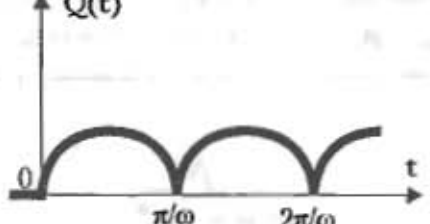
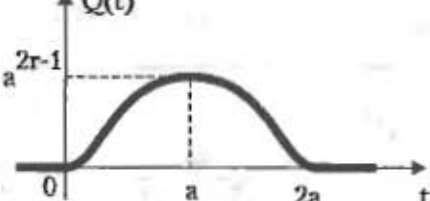


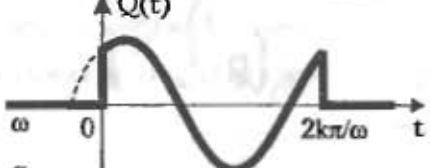
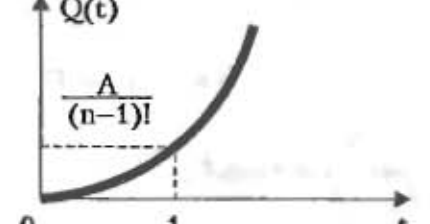
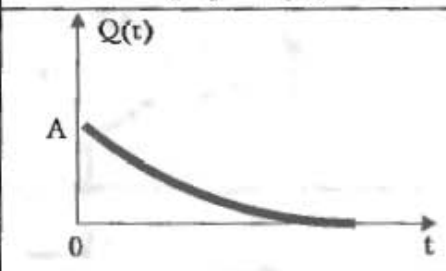
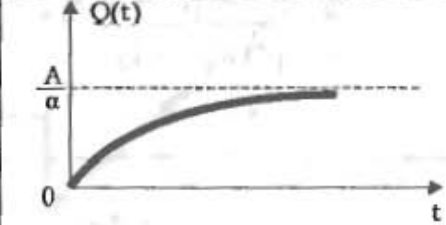
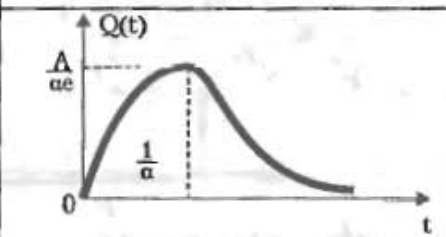
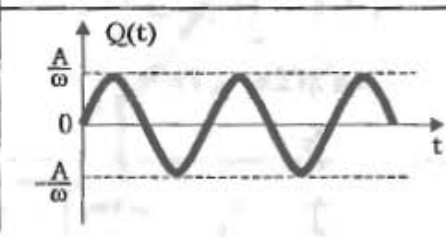
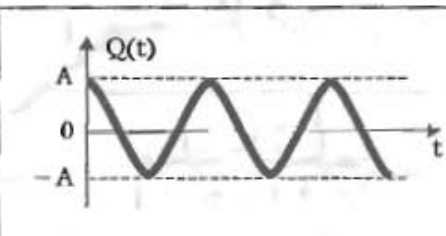
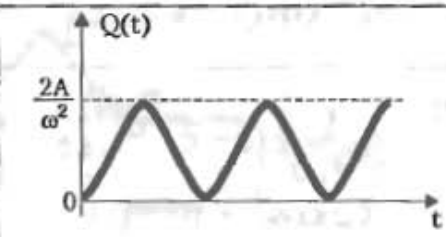
График Q(t)	Оригинал	Изображение
	$a \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k 1(t - k\tau)$	$\frac{a}{p} \frac{1}{1 + e^{-p\tau}}$
	$\frac{a}{\tau} \left[t \cdot 1(t) - \sum_{k=1}^{\infty} 1(t - k\tau) \right]$	$\frac{a}{\tau} \frac{e^{p\tau} - p\tau - 1}{p^2(e^{p\tau} - 1)}$
	$ \sin \omega t $	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{\omega} p}}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega} p}}$
	$\begin{aligned} & [a^2 - (t - a)^2]^{\nu - \frac{1}{2}} \\ & \text{при } 0 < t < 2a \\ & 0 \text{ при } 2a < t < \infty \end{aligned}$	$\Gamma\left(\nu + \frac{1}{2}\right) p^{-\nu} e^{-ap} \times \sqrt{\pi}(2a)^{\nu} L_{\nu}(ap)$
	$\begin{aligned} & \sin \omega t \text{ при } 0 < t < \frac{2k\pi}{\omega} \\ & 0 \text{ при } \frac{2k\pi}{\omega} < t < \infty \end{aligned}$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \left(1 - e^{-\frac{2k\pi p}{\omega}} \right)$
	$\begin{aligned} & \sin \omega t \text{ при } 0 < t < \tau \\ & 0 \text{ при } \tau < t < \infty \end{aligned}$	$\frac{1}{\sqrt{p^2 + 1}} \left[\frac{1}{\sqrt{p^2 + 1}} - e^{-p\tau} \cos(\tau + \arctg p) \right]$
	$\begin{aligned} & \sin(\omega t + \alpha) \text{ при } 0 < t < \frac{2k\pi}{\omega} \\ & 0 \text{ при } \frac{2k\pi}{\omega} < t < \infty \end{aligned}$	$\frac{1}{p^2 + \omega^2} \left(1 - e^{-\frac{2k\pi p}{\omega}} \right) \times (\omega \cos \alpha + p \sin \alpha)$
	$\frac{A}{(n-1)!} t^{n-1}$	$\frac{A}{p^n}$

Таблица 1 (продолжение)

График $Q(t)$	Оригинал	Изображение
	$Ae^{-\alpha t}$	$\frac{A}{p + \alpha}$
	$\frac{A}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t})$	$\frac{A}{p(p + \alpha)}$
	$\frac{A}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-\alpha t}$	$\frac{A}{(p + \alpha)^n}$
	$\frac{A}{\omega} \sin \omega t$	$\frac{A}{p^2 + \omega^2}$
	$A \cos \omega t$	$\frac{Ap}{p^2 + \omega^2}$
	$\frac{A}{\omega^2} (1 - \cos \omega t)$	$\frac{A}{p(p^2 + \omega^2)}$

2. Решение этого уравнения

$$T(p) = T_{cp} \frac{e^{-\tau p}}{p(\epsilon p + 1)}$$

представляет собой изображение отклика на входное воздействие.

3. Оригинал отклика

$$T(t) = L^{-1}[T(p)] = T_{cp} \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{\epsilon}} \right).$$

2.2.3. Спектральный метод решения уравнения динамики

При некоторых видах входных воздействий для алгебраизации уравнения динамики удобнее пользоваться не преобразованием Лапласа, а преобразованием Фурье:

$$\begin{aligned}\dot{X}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt; \\ \dot{Q}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} Q(t)e^{-j\omega t} dt,\end{aligned}\quad (6)$$

где $\dot{X}(\omega)$ и $\dot{Q}(\omega)$ — комплексные спектры соответственно отклика $X(t)$ и входного воздействия $Q(t)$. Операция (6) называется *прямым преобразованием Фурье* и обозначается

$$\begin{aligned}\Phi[X(t)] &= \dot{X}(\omega); \\ \Phi[Q(t)] &= \dot{Q}(\omega) Z.\end{aligned}$$

Спектр первой производной

$$\Phi[X'(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} X'(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} dX(t)$$

получается после интегрирования по частям:

$$\Phi[X'(t)] = X(t)e^{-j\omega t} \Big|_{-\infty}^{\infty} + j\omega \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt = j\omega \dot{X}(\omega).$$

Аналогично можно показать, что

$$\Phi[X''(t)] = (j\omega)^2 \dot{X}(\omega);$$

$$\Phi[X^{(n)}(t)] = (j\omega)^n \dot{X}(\omega).$$

С учетом этих соотношений дифференциальное уравнение динамики (1) преобразуется в алгебраическое:

$$[a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 j\omega + a_0] \dot{X}(\omega) = \dot{Q}(\omega).$$

Отношение

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{\dot{Q}(\omega)} = \frac{1}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 j\omega + a_0} \quad (7)$$

называется *комплексным коэффициентом преобразования (передачи)*. Как и передаточная функция, комплексный коэффициент преобразования относится к числу нормируемых динамических характеристик. Он характеризует инерционные свойства средства измерений и может использоваться для изучения

переходного режима его работы. Модуль комплексного коэффициента преобразования $K(\omega)$ называется *амплитудно-частотной*, а фаза $\varphi(\omega)$ — *фазо-частотной* характеристиками (АЧХ и ФЧХ) средства измерений.

Зная комплексный коэффициент преобразования $\dot{K}(\omega)$ и комплексный спектр входного воздействия $\dot{Q}(\omega)$, можно по формуле

$$\dot{X}(\omega) = \dot{K}(\omega) \cdot \dot{Q}(\omega)$$

найти комплексный спектр отклика средства измерений на это входное воздействие, после чего, применив *обратное преобразование Фурье*

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

обозначаемое

$$\Phi^{-1}[\dot{X}(\omega)] = X(t),$$

определить сам отклик.

Пример 10

Решить уравнение динамики, составленное в примере 6, спектральным методом.

Решение

1. Применив преобразование Фурье к левой и правой частям уравнения, перейдем к его алгебраической форме:

$$(j\omega)^2 \dot{X}(\omega) + 2\delta \cdot j\omega \dot{X}(\omega) + \omega_0^2 \dot{X}(\omega) = g \left[\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right] (\omega).$$

2. Решение этого уравнения

$$\dot{X}(\omega) = \frac{g \left[\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right]}{(j\omega)^2 + 2\delta \cdot j\omega + \omega_0^2}$$

представляет собой спектр отклика на входное воздействие.

3. Сам отклик находится обратным преобразованием Фурье:

$$X(t) = \Phi^{-1}[\dot{X}(\omega)].$$

При $\delta \ll \omega_0$

$$X(t) = \frac{g}{\omega_0^2} (1 - e^{\delta t} \cos \omega_0 t).$$

2.2.4. Обратная задача динамики

До сих пор рассматривалось входное воздействие $Q(t)$ в виде так называемой *ступени*. На практике зависимость измеряемой величины от времени может быть гораздо более сложной. Задача измерения состоит в определении этой неизвестной зависимости $Q(t)$ по зарегистрированному отклику $X(t)$ посредст-

вом решения уравнения (1). Такая задача называется *обратной задачей динамики*¹.

В общем случае обратная задача динамики не имеет решения. Очень часто, например, в отклике $X(t)$ не содержится всей необходимой информации о $Q(t)$, потому что высокочастотные составляющие входного воздействия отфильтрованы вследствие инерционных свойств средства измерений, и информация о них безвозвратно потеряна. Однако в некоторых случаях при наличии определенной априорной информации о $Q(t)$ обратная задача динамики может быть решена.

Так, в частности, на основе априорных сведений о входном воздействии иногда можно подобрать такую зависимость $Q(t)$, при которой отклик на нее средства измерений с достаточной степенью точности совпадает с реально наблюдаемым. Тогда можно считать, что входное воздействие с выбранной степенью точности совпадает с подобранной зависимостью $Q(t)$.

Пример 11

Отклик дифференцирующей цепи (рис. 10) на линейно нарастающее напряжение представлен на рис. 11, б. Определить входное воздействие.

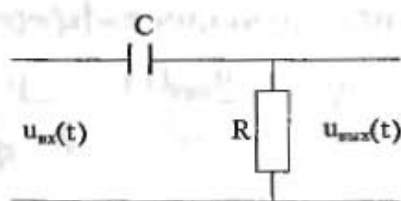


Рис. 10. Дифференцирующая цепь

Решение методом замещения. Если имеется такая возможность, то на вход дифференцирующей цепи подаются линейно нарастающие напряжения различной крутизны (рис. 11, а), и из них выбирается такое $u_{\text{вх}}(t)$, отклик на которое с требуемой точностью совпадает с представленным на рис. 11, б. Это $u_{\text{вх}}(t)$ с выбранной точностью и принимается за входное воздействие.

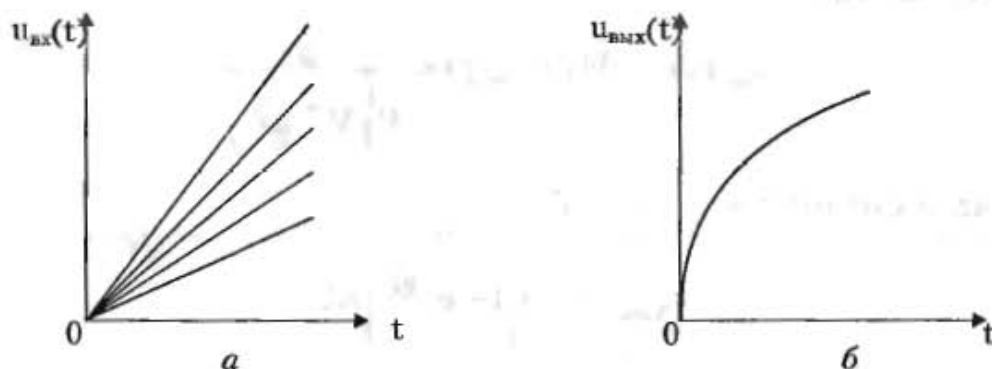


Рис. 11. Отклик дифференцирующей цепи (б) на линейно нарастающее напряжение (а)

¹ В задачах динамики (прямой и обратной) не учитывается стохастический характер отклика, обусловленный влиянием множества факторов, точный учет которых невозможен, а результат непредсказуем.

Решение расчетным путем. Составим уравнение динамики. Согласно второму закону Кирхгофа

$$u_C + u_R = u_{\text{вх}}(t),$$

где $u_R = u_{\text{вых}}(t)$. Так как ток в цепи $i = \frac{u_R}{R}$, то $u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{RC} \int u_R dt$. Отсюда

$$\frac{1}{RC} \int u_R dt + u_R = u_{\text{вх}}(t).$$

Продифференцировав обе части этого уравнения по t , получим уравнение динамики:

$$\frac{du_R}{dt} + \frac{1}{RC} u_R = \frac{du_{\text{вх}}}{dt}.$$

В операторной форме это уравнение имеет вид:

$$\left(p + \frac{1}{RC} \right) u_{\text{вых}}(p) = p u_{\text{вх}}(p).$$

Следовательно, передаточная функция дифференцирующей цепи

$$W(p) = \frac{u_{\text{вых}}(p)}{u_{\text{вх}}(p)} = \frac{p}{p + \frac{1}{RC}}.$$

Согласно априорной информации входное воздействие $u_{\text{вх}}(t) = at$, где неизвестный постоянный коэффициент a определяется посредством измерения.

Изображение входного воздействия (см. табл. 1)

$$u_{\text{вх}}(p) = \frac{a}{p^2}.$$

Изображение отклика дифференцирующей цепи на линейно нарастающее входное воздействие

$$u_{\text{вых}}(p) = W(p) u_{\text{вх}}(p) = \frac{a}{p \left(p + \frac{1}{RC} \right)},$$

а сам отклик (оригинал по табл. 1)

$$u_{\text{вых}}(t) = a \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) RC.$$

В этом уравнении с одним неизвестным a подбирается таким, чтобы $u_{\text{вых}}(t)$ с требуемой точностью совпало с представленным на рис. 11, б.

В некоторых случаях отклик средства измерений внешне не имеет ничего общего с входным воздействием, однако при наличии достаточного объема априорной информации позволяет определить его форму.

Пример 12

Отклик дифференцирующей цепи, рассмотренной в примере 11, на трапецеидальный импульс представлен на рис. 12, б. Определить входное воздействие.

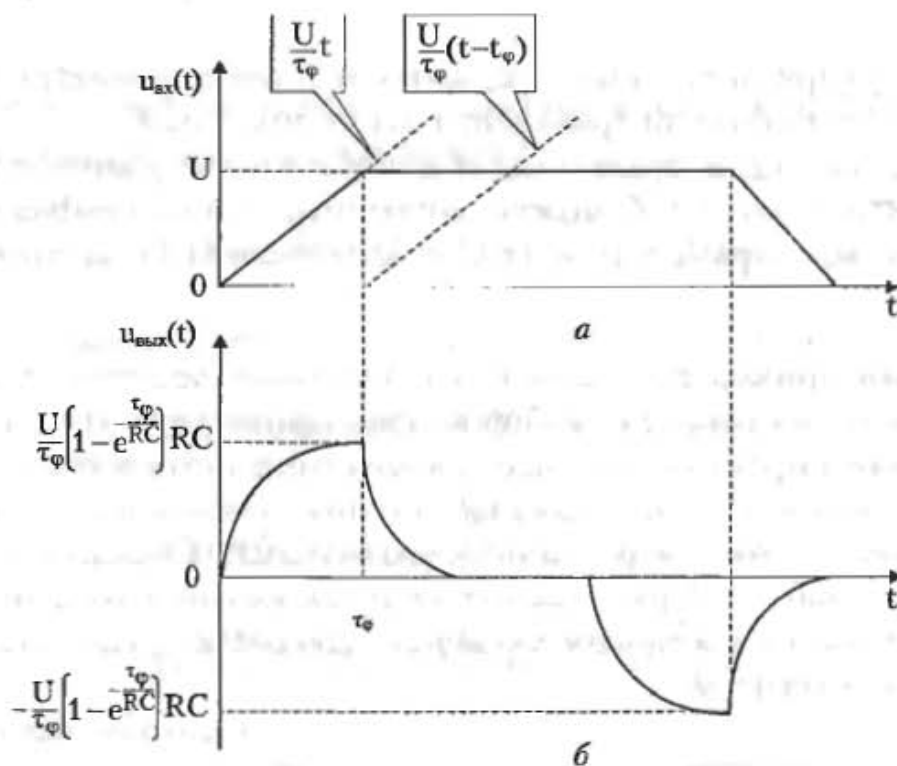


Рис. 12. Отклик дифференцирующей цепи (б) на трапецеидальный импульс (а)

Решение. Согласно априорной информации в течение времени τ_φ , соответствующего длительности переднего фронта трапецеидального импульса,

$$u_{\text{вх}}(t) = \frac{U}{\tau_\varphi} t.$$

На вершине импульса

$$u_{\text{вх}} = \frac{U}{\tau_\varphi} t - u(t - \tau_\varphi),$$

где

$$u(t - \tau_\varphi) = \frac{U}{\tau_\varphi} (t - \tau_\varphi).$$

Отклик на передний фронт трапецеидального импульса (см. предыдущий пример)

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{U}{\tau_\varphi} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) RC.$$

Отклик на входное воздействие $u(t - \tau_\varphi)$

$$u_{\text{вых}}(t - \tau_\varphi) = \frac{U}{\tau_\varphi} \left(1 - e^{-\frac{t - \tau_\varphi}{RC}}\right) RC,$$

следовательно, отклик на вершину импульса

$$u_{\text{вых}} = \frac{U}{\tau_{\varphi}} e^{-\frac{t}{RC}} \left(e^{\frac{\tau_{\varphi}}{RC}} - 1 \right) RC.$$

Аналогично (при ненулевых начальных условиях) решается уравнение динамики для заднего фронта трапецеидального импульса.

График на рис. 12, а представляет окончательное решение задачи. Сравнивая рис. 12, а и рис. 12, б, можно заключить, что по графику на рис. 12, б определяются все параметры входного воздействия (трапецеидального импульса).

Приведенный пример показывает, что успешное решение обратной задачи динамики иногда достигается выбором специфического средства измерений (в данном случае дифференцирующего измерительного преобразователя).

Решение обратной задачи динамики методом подбора входного воздействия предполагает использование различных его моделей. Сведения о некоторых из них приведены в табл. 1. При сложных моделях входных воздействий отклики на них рассчитываются *методом интеграла Дюамеля*. Сущность этого метода заключается в следующем.

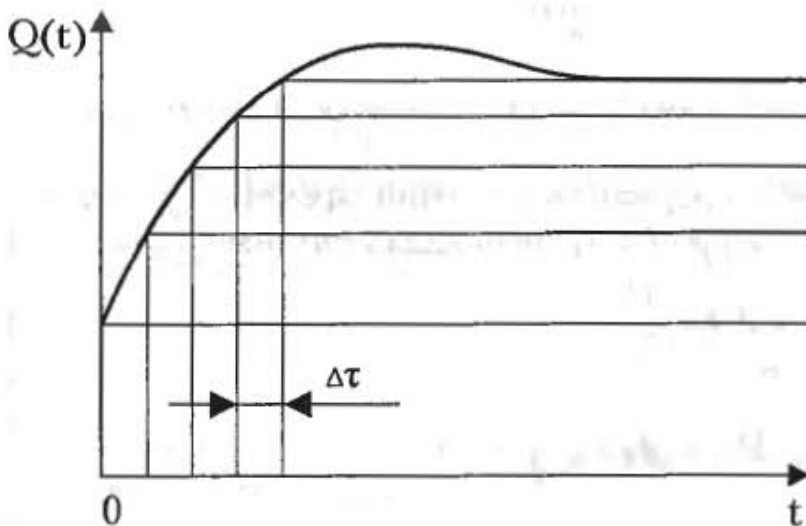


Рис. 13. Разложение входного воздействия на ступени

Сложное входное воздействие (см. рис. 13) рассматривается как сумма начальной ступени $Q(0) \cdot 1(t)$ и следующих через равные промежутки времени $\Delta\tau$ маленьких ступеней, величина которых $\Delta Q(n \cdot \Delta\tau) \approx \Delta\tau \cdot Q'(n \cdot \Delta\tau)$.

Ранее уже использовалось в решении примеров 9, 11 приведенное в табл. 1 входное воздействие в виде *единичной ступени*

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

Отклик $h(t)$ средства измерений на такое входное воздействие называется *переходной характеристикой*. Так же как передаточная функция и комплексный коэффициент преобразования, переходная характеристика отражает инерционные свойства средства измерений и относится к числу нормируемых динамических характеристик.

Отклик средства измерений на каждую n -ю ступень, показанную на рис. 13, равен величине этой ступени, умноженной на $h(t - n \cdot \Delta\tau)$. В соответствии с принципом суперпозиции (наложения), справедливым для линейных систем, в каж-

дый дискретный момент времени $t = k \cdot \Delta\tau$ отклик средства измерений определяется как сумма откликов на все предшествующие ступени:

$$X(t) = Q(0) h(t) + \sum_{n=1}^k \Delta\tau \cdot Q'(n \cdot \Delta\tau) h(t - n \cdot \Delta\tau).$$

Переходя к пределу при $n \rightarrow \infty$ и $\Delta\tau \rightarrow 0$, получим одну из форм так называемого интеграла Дюамеля (интеграла наложения):

$$X(t) = Q(0) h(t) + \int_0^t Q'(\tau) h(t - \tau) d\tau.$$

С помощью несложных преобразований можно получить и другие его формы:

$$X(t) = Q(t) h(0) + \int_0^t Q(\tau) h'(t - \tau) d\tau;$$

$$X(t) = Q(0) h(t) + \int_0^t Q'(t - \tau) h(\tau) d\tau;$$

$$X(t) = Q(t) h(0) + \int_0^t Q(t - \tau) h'(\tau) d\tau.$$

При расчетах выбирается та из них, подынтегральная функция у которой проще.

2.2.5. Типовые динамические звенья

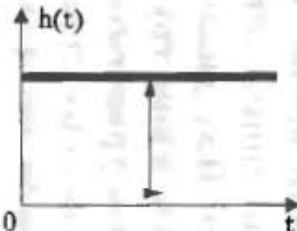

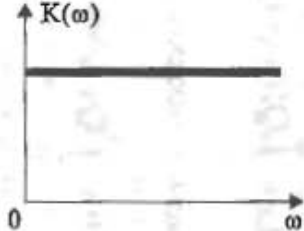
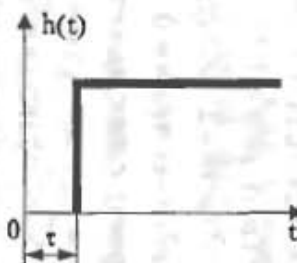
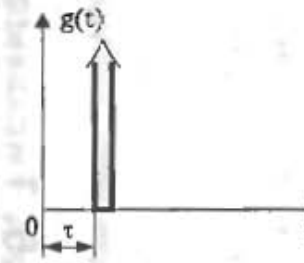
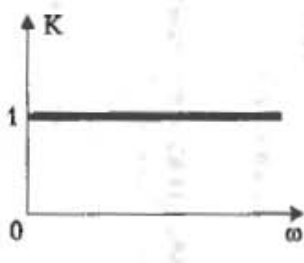
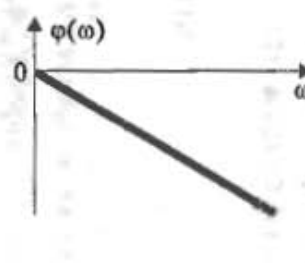
Любое средство измерений при анализе его инерционных свойств можно представить в виде совокупности определенным образом связанных между собой элементарных *динамических звеньев*. Под динамическим звеном понимается устройство любого физического вида и конструктивного оформления, работа которого описывается определенным уравнением, т. е. каждое звено обладает характерными для него динамическими свойствами. Одним и тем же уравнением может описываться работа самых разнообразных устройств (механических, электрических, тепловых и др.), но все они в этом случае будут относиться к динамическому звену одного и того же типа. Такие звенья принято называть *типовыми*. Математическое описание и характеристики инерционных свойств типовых динамических звеньев приведены в табл. 2.

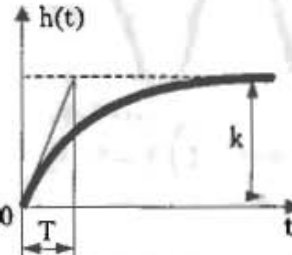
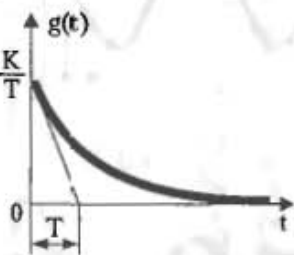
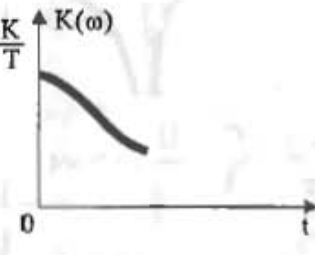
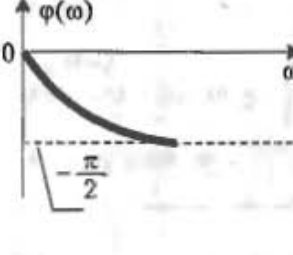
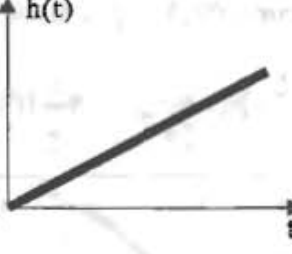
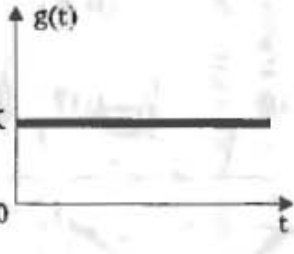
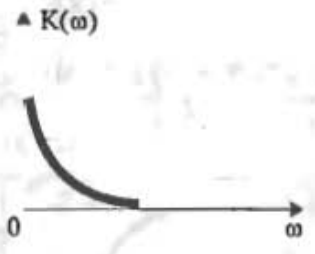
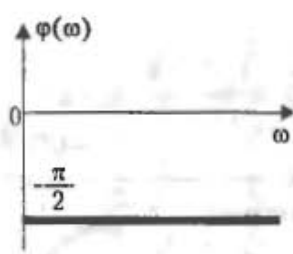
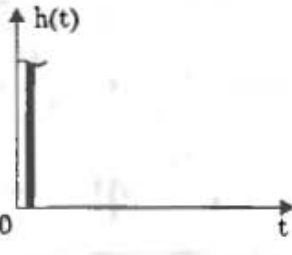
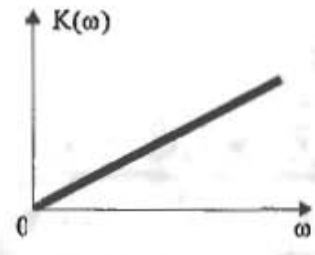
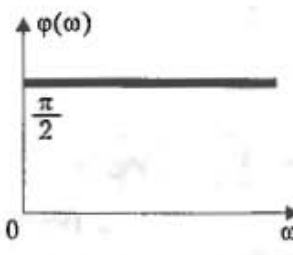
В число характеристик средств измерений, определяющих их инерционные свойства и относящихся к нормируемым динамическим характеристикам, в табл. 2 включена *импульсная характеристика* $g(t)$, представляющая собой отклик средства измерений на *единичный импульс*

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0; \\ \infty & \text{при } t = 0, \end{cases}$$

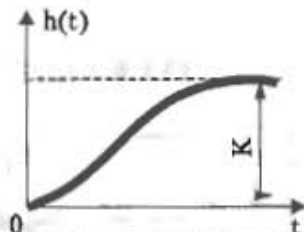
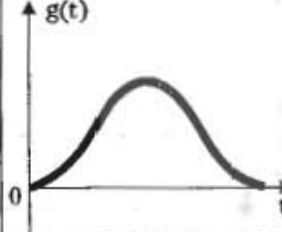
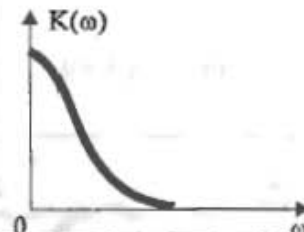
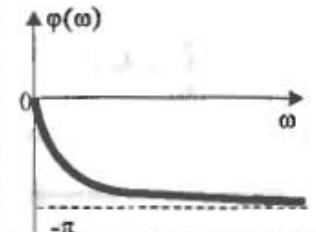
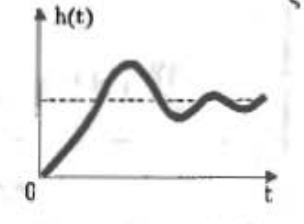

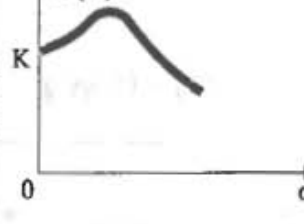
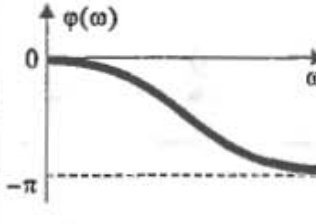
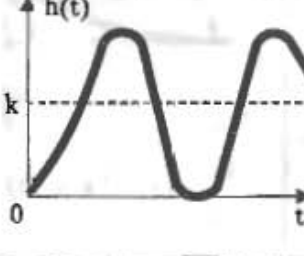
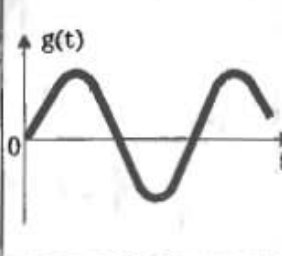
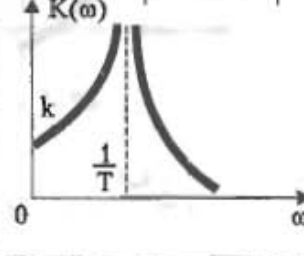
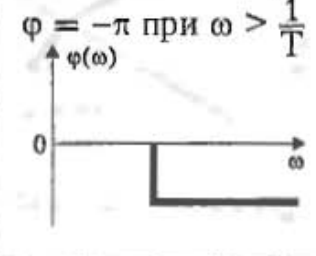
называемый так потому, что площадь, ограниченная этой функцией, равна 1. Как видно из табл. 2, *единичный импульс* есть не что иное, как первая производная от *единичной ступени*. Иногда он называется *дельта-функцией* или *функцией Дирака*.

Таблица 2

Наименование	Уравнение звена	Передаточная функция	Переходная характеристика	Импульсная характеристика	Амплитудно-частотная характеристика	Фазо-частотная характеристика
1	2	3	4	5	6	7
Звенья первого порядка						
Усилительное (пропорциональное)	$y = kx$, где k — коэффициент усиления	$W(p) = k$	$h(t) = k \cdot 1'(t)$ 	$g(t) = k \cdot 1'(t)$ 	$K(\omega) = k$ 	$\varphi(\omega) = 0$
Задерживающее	$y(t) = x(t-\tau)$, где τ — время задержки	$W(p) = e^{-p\tau}$	$h(t) = 1(t-\tau)$ 	$g(t) = 1'(t-\tau)$ 	$K(\omega) = 1$ 	$\varphi(\omega) = -\omega\tau$ 

<p>Апериодическое (инерционное) первого порядка</p>	$T \frac{dy}{dt} + y = kx,$ <p>где T — постоянная времени; k — коэффициент усиления</p>	$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$	$h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$ 	$g(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}$ 	$K(\omega) = \frac{k}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}}$ 	$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \omega T$ 
<p>Интегрирующее</p>	$y = k \int_0^t x dt,$ <p>или $\frac{dy}{dt} = kx,$ где k — коэффициент усиления</p>	$W(p) = \frac{k}{p}$	$h(t) = kt$ 	$g(t) = k$ 	$K(\omega) = k\omega$ 	$\varphi = -\frac{\pi}{2}$ 
<p>Дифференцирующее</p>	$y = k \frac{dx}{dt},$ <p>где k — коэффициент усиления</p>	$W(p) = kp$	$h(t) = k \cdot 1'(t)$ 		$K(\omega) = k\omega$ 	$\varphi = \frac{\pi}{2}$ 

Звенья второго порядка

1	2	3	4	5	6	7
<p>Апериодическое второго порядка $\zeta > 1$</p>	$T^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta T \frac{dy}{dt} + y = kx,$ <p>где T — постоянная времени; k — коэффициент усиления; ζ — степень затухания</p>	$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\zeta T p + 1}$	$h(t) = k \left[1 - \frac{r_2}{r_2 - r_1} e^{-r_1 \frac{t}{T}} + \frac{r_1}{r_2 - r_1} e^{-r_2 \frac{t}{T}} \right],$ <p>где $r_1 = \zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}, r_2 = \zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}$</p> 	$g(t) = \frac{k}{2T\sqrt{\zeta^2 - 1}} \times (e^{-\eta \frac{t}{T}} - e^{-r_2 \frac{t}{T}})$ 	$K(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\zeta^2 \omega^2 T^2}}$ 	$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\zeta\omega T}{1 - \omega^2 T^2}$ 
<p>Колебательное $0 < \zeta < 1$</p>	<p>где T — постоянная времени; k — коэффициент усиления; ζ — степень затухания</p>	$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\zeta T p + 1}$	$h(t) = k \left[1 - \frac{e^{-\zeta \frac{t}{T}}}{r} \sin\left(r \frac{t}{T} + \varphi\right) \right],$ <p>где $r_1 = \sqrt{1 - \zeta^2}, \varphi = \arctg \frac{\zeta}{r}$</p> 	$g(t) = \frac{k}{T} \frac{e^{-\zeta \frac{t}{T}}}{r} \sin \frac{t}{T}$ 	$K(\omega) = \frac{k}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\zeta^2 \omega^2 T^2}$ 	$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\zeta\omega T}{1 - \omega^2 T^2}$ 
<p>Консервативное $\zeta = 0$</p>		$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 1}$	$h(t) = k \left(1 - \cos \frac{t}{T} \right)$ 	$g(t) = \frac{k}{T} \sin \frac{t}{T}$ 	$K(\omega) = \frac{k}{ 1 - \omega^2 T^2 }$ 	$\varphi = 0 \text{ при } \omega < \frac{1}{T};$ $\varphi = -\pi \text{ при } \omega > \frac{1}{T}$ 

Все многообразие структурных схем средств измерений может быть представлено с помощью трех вариантов соединения типовых динамических звеньев: последовательного, параллельного и с обратной связью.

Последовательным называется такое соединение звеньев, при котором отклик предыдущего звена является входным воздействием для последующего (рис. 14).

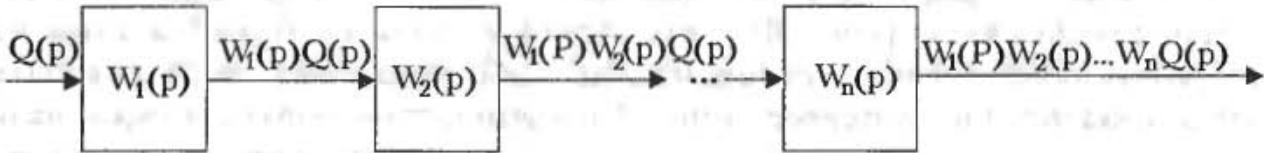


Рис. 14. Последовательное соединение типовых динамических звеньев

В операторной форме, как показано на рис. 14,

$$X_{\text{вых}}(p) = W_1(p) W_2(p) \dots W_n(p) Q(p).$$

Таким образом, передаточная функция последовательного соединения типовых динамических звеньев равна произведению их передаточных функций:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p).$$

Параллельным называется такое соединение звеньев, при котором входное воздействие является общим для всех звеньев, а отклики на него суммируются (рис. 15).

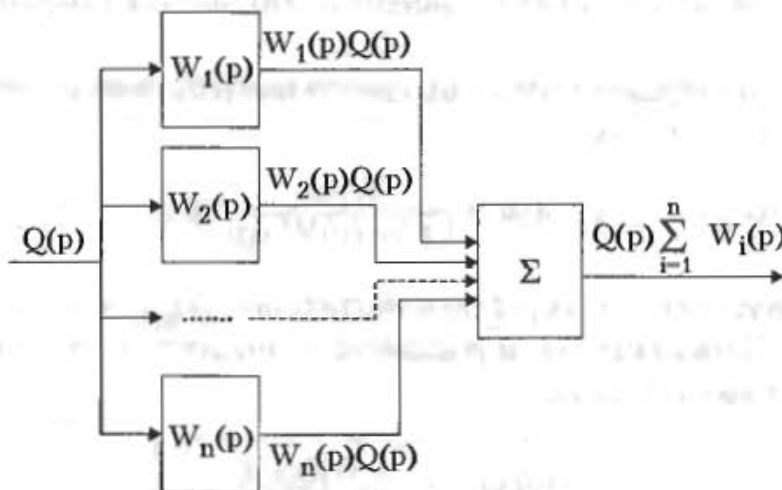



Рис. 15. Параллельное соединение типовых динамических звеньев

В операторной форме, как показано на рис. 15,

$$X_{\text{вых}}(p) = Q(p) \sum_{i=1}^n W_i(p).$$

Таким образом, передаточная функция параллельного соединения типовых динамических звеньев равна сумме их передаточных функций:

$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p).$$

Соединением с обратной связью называется такое соединение звеньев, при котором отклик первого звена является одновременно откликом всего соединения в целом и входным воздействием второго звена, а отклик второго звена, алгебраически суммируясь с измеряемой величиной, образует входное воздействие первого звена (рис. 16). Суть обратной связи заключается в том, что преобразованный вторым звеном отклик либо усиливает, либо ослабляет входное воздействие на первое звено. В первом случае обратная связь называется положительной, во втором — отрицательной. Отрицательную обратную связь на схемах принято обозначать зачерненным сектором в суммирующем элементе .

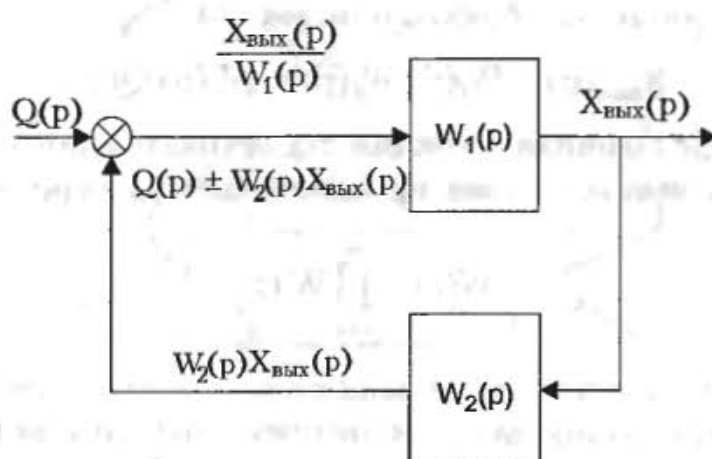


Рис. 16. Соединение типовых динамических звеньев с обратной связью

Приравнявая изображения для входного воздействия на первое звено, показанные на рис. 16, получим:

$$X_{\text{вых}}(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)W_2(p)} Q(p),$$

где уже знак минус соответствует положительной обратной связи, а знак плюс — отрицательной. Передаточная функция соединения двух типовых динамических звеньев с обратной связью

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)W_2(p)}.$$

В общем случае передаточная функция соединения с обратной связью представляет собой дробь, числитель которой равен передаточной функции звеньев, расположенных между точками входного воздействия и отклика на него, а знаменатель — увеличенному на единицу произведению передаточных функций всех звеньев соединения.

Пример 13

Структурная схема соединения динамических звеньев приведена на рис. 17, а. Определить передаточную функцию измерительного преобразователя.

быть разложено на простые дроби, оригиналы для которых известны из табл. 1. Оригинал отклика в этом случае равен сумме оригиналов изображений в виде простых дробей.

Предположим, что изображение отклика имеет вид дроби:

$$X(p) = \frac{Y(p)}{Z(p)},$$

где $Y(p)$ и $Z(p)$ — степенные полиномы, причем степень полинома $Y(p)$ меньше степени n полинома $Z(p)$. Если найти корни α_i уравнения $Z(p) = 0$, то указанную дробь можно единственным образом представить в виде суммы простейших правильных дробей. Подобное представление известно в математике как *разложение на простые дроби*. При различных вещественных корнях α_i члены разложения имеют вид $\frac{A_i}{p - \alpha_i}$ и, в частности, $\frac{A_0}{p}$ при $\alpha_0 = 0$, где A_i — постоянные вещественные коэффициенты. Каждому из комплексных корней соответствует дробь того же вида, но коэффициенты ее не являются вещественными. Чтобы избежать операций с комплексными числами, выделяют элементарные дроби вида $\frac{Bp + C}{p^2 + \beta p + \gamma}$, соответствующие паре комплексно-сопряженных корней. Таким образом, в общем случае изображение отклика можно представить следующей суммой простых дробей:

$$X(p) = \frac{A_0}{p} + \frac{A_1}{p - \alpha_1} + \frac{A_2}{p - \alpha_2} + \dots + \frac{A_r}{p - \alpha_r} + \frac{B_1 p + C_1}{p^2 + \beta_1 p + \gamma_1} + \dots + \frac{B_\ell p + C_\ell}{p^2 + \beta_\ell p + \gamma_\ell},$$

где $\gamma + 2\ell + 1 = n$. Для определения коэффициентов $A_0, A_1, \dots, A_r, B_1, C_1, \dots, B_\ell, C_\ell$ существует несколько способов. Достаточно просто эти коэффициенты определяются известным в математике *методом неопределенных коэффициентов*.

Пример 14

Изображение отклика средства измерений на входное воздействие

$$X(p) = \frac{b_1 p + b_0}{p^2 + a_1 p}.$$

Найти оригинал отклика, используя теорему разложения.

Решение

1. Корни уравнения $p^2 + a_1 p = 0$ вещественные: $\alpha_0 = 0$; $\alpha_1 = -a_1$.
2. Разложение изображения отклика на простые дроби имеет вид:

$$X(p) = \frac{A_0}{p} + \frac{A_1}{p + a_1}.$$

3. Для определения A_0 и A_1 воспользуемся методом неопределенных коэффициентов. Приравнивая друг к другу два выражения для $X(p)$, получим:

$$\frac{b_1 p + b_0}{p^2 + a_1 p} = \frac{A_0(p + a_1) + A_1}{p^2 + a_1 p}.$$

Отсюда

$$b_1 p + b_0 = (A_0 + A_1) p + a_1 A_0.$$

Сравнение коэффициентов при одинаковых степенях p дает:

$$A_0 + A_1 = b_1;$$

$$a_1 A_0 = b_0,$$

из чего вытекает, что

$$A_0 = \frac{b_0}{a_1}; \quad A_1 = b_1 - \frac{b_0}{a_1}.$$

4. Таким образом, разложение $X(p)$ на простые дроби:

$$X(p) = \frac{b_0}{a_1 p} + \frac{b_1 - \frac{b_0}{a_1}}{p + a_1}.$$

5. Используя табл. 1, окончательно получаем:

$$X(t) = \frac{b_0}{a_1} + \left(b_1 - \frac{b_0}{a_1} \right) e^{-a_1 t}.$$

2.3. Стационарный режим

До сих пор предполагалось, что переходный режим работы средства измерений с течением времени переходит в установившийся. Однако так бывает далеко не всегда. Например, при непрерывно (и, в частности, периодически) изменяющемся входном воздействии инерционность средства измерений может привести к тому, что оно все время будет работать в неустановившемся режиме, характеризующемся искажениями входного воздействия. В порядке иллюстрации рассмотрим работу *пикового детектора* — измерительного преобразователя, находящего широкое применение в вольтметрах переменного напряжения.

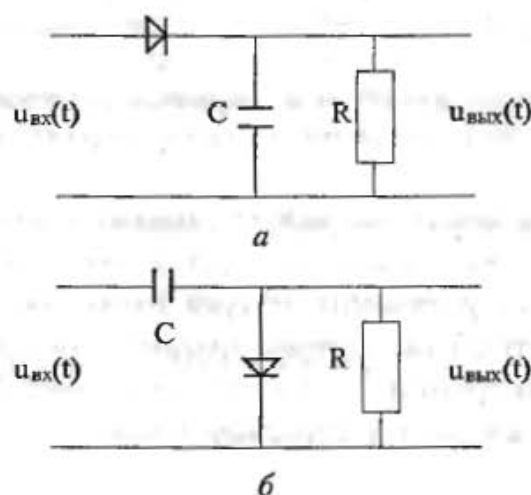


Рис. 18. Пиковый детектор с открытым (а) и закрытым (б) входом

Два варианта схемного исполнения пикового детектора приведены на рис. 18. При подаче на вход синусоидального напряжения во время положительных полупериодов происходит заряд конденсатора через сопротивление диода и внутреннее сопротивление источника. Во время отрицательных полупериодов конденсатор разряжается в пиковом детекторе с открытым входом через сопротивление нагрузки R , а в пиковом детекторе с закрытым входом — через нагрузочный резистор R и внутреннее сопротивление источника. Отклик пикового детектора на синусоидальное входное напряжение показан на рис. 19. Постоянная времени разряда много больше постоянной времени заряда. Поэтому через несколько периодов к обкладкам конденсатора оказывается приложенным слабо пульсирующее напряжение, постоянная составляющая которого U_0 (на рис. 19 она показана пунктиром) немного меньше амплитуды входного сигнала U_m . У пикового детектора с открытым входом, откликом является напряжение на конденсаторе, а у пикового детектора с закрытым входом постоянная составляющая напряжения на конденсаторе может рассматриваться как источник постоянного напряжения, включенный последовательно с $U_{вх}$. Поэтому у пикового детектора с закрытым входом $U_{вых} = U_m \sin \omega t - U_0$.

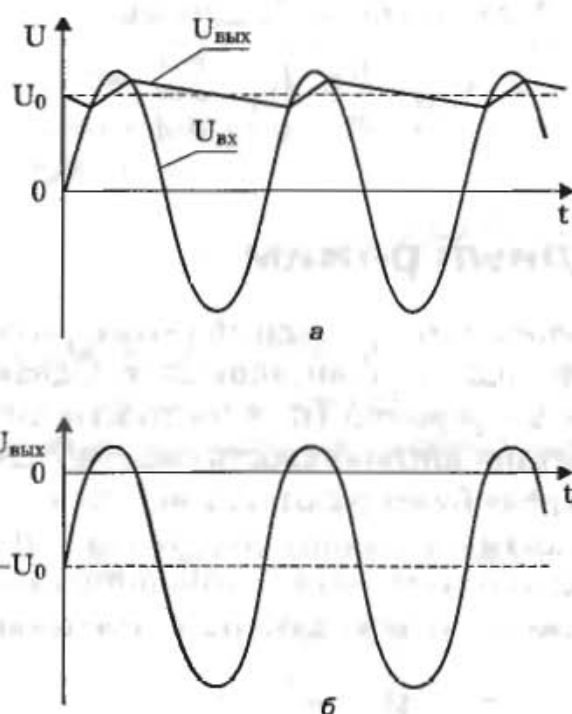


Рис. 19. Отклик пикового детектора с открытым (а) и закрытым (б) входами на синусоидальное входное напряжение

Как бы долго ни продолжалась работа пикового детектора в рассматриваемом режиме, напряжение на его выходе ни при каких обстоятельствах не будет стремиться к постоянному установившемуся значению. Вместе с тем основные характеристики (параметры) выходного процесса остаются постоянными. Режим работы средства измерений, при котором параметры выходного процесса не зависят от времени, называется *стационарным*.

2.4. Нестационарный режим

Режим работы средства измерений, при котором хотя бы один из параметров выходного процесса меняется с течением времени, называется *нестационарным*.

Так, в приведенном выше примере выход на стационарный режим работы пикового детектора осуществлялся в течение некоторого времени, пока конденсатор подзаряжался до установившегося среднего значения напряжения на его обкладках. Все это время пиковый детектор работал в нестационарном режиме.

Анализ нестационарного режима работы линейных средств измерений может производиться классическим, операторным или спектральным методом.

Пример 15

Исследовать режим работы измерительного преобразователя в виде последовательного колебательного контура с резонансной частотой ω_0 , показанного на рис. 20, при подаче на него напряжения

$$u_{\text{вх}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cos \omega_0 t & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

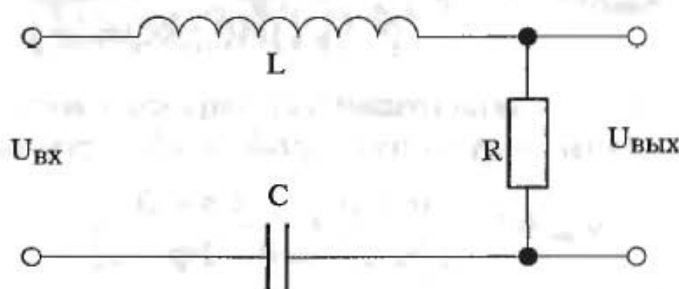


Рис. 20. Измерительный преобразователь в виде последовательного колебательного контура

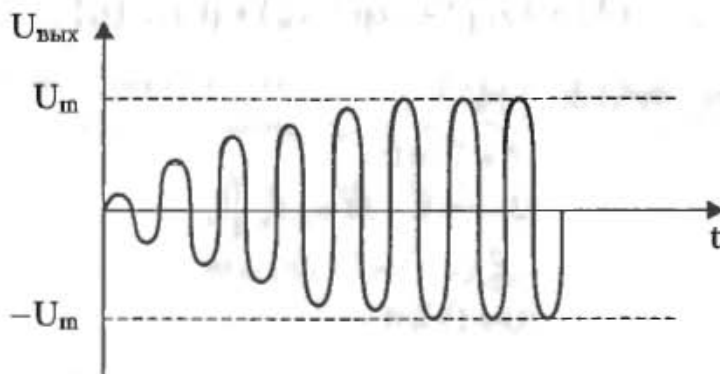


Рис. 21. Нестационарный режим работы измерительного преобразователя, показанного на рис. 20, при подаче на его вход напряжения, меняющегося по гармоническому закону

Решение

1. Составим уравнение динамики. Согласно второму закону Кирхгофа

$$u_L + u_R + u_C = u_{\text{вх}}(t),$$

где $u_R = u_{\text{вых}}(t)$. Так как ток в контуре $i = u_R/R$, то

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \frac{L}{R} \frac{du_{\text{вых}}(t)}{dt}; \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{RC} \int u_{\text{вых}}(t) dt.$$

Отсюда

$$\frac{L}{R} \frac{du_{\text{вых}}(t)}{dt} + u_{\text{вых}}(t) + \frac{1}{RC} \int u_{\text{вых}}(t) dt = u_{\text{вх}}(t).$$

Продифференцировав обе части этого уравнения по t , получим уравнение динамики:

$$\frac{d^2 u_{\text{вых}}(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_{\text{вых}}(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_{\text{вых}}(t) = \frac{R}{L} \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}.$$

2. В операторной форме уравнение динамики имеет вид:

$$\left(p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} \right) u_{\text{вых}}(p) = \frac{R}{L} p u_{\text{вх}}(p),$$

где согласно табл. 1 $u_{\text{вх}}(p) = \frac{U_m p}{p^2 + \omega_0^2}$. Введя обозначения для коэффициента

затухания контура $\delta = \frac{R}{2L}$ и резонансной частоты $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, получим:

$$u_{\text{вых}}(p) = U_m \frac{R}{L} \frac{p^2}{(p^2 + \omega_0^2)(p^2 + 2\delta p + \omega_0^2)}.$$

Для перехода от изображения отклика к оригиналу воспользуемся теоремой разложения и представим полученную дробь в виде суммы двух простейших

$$u_{\text{вых}}(p) = \frac{Ap + B}{p^2 + \omega_0^2} + \frac{Cp + D}{p^2 + 2\delta p + \omega_0^2}.$$

Коэффициенты A , B , C и D найдем методом неопределенных коэффициентов. Из двух последних выражений следует, что

$$U_m \frac{R}{L} p^2 = (Ap + B)(p^2 + 2\delta p + \omega_0^2) + (Cp + D)(p^2 + \omega_0^2).$$

Это равенство справедливо, если

$$\begin{aligned} A + C &= 0; \\ 2\delta A + B + D &= U_m \frac{R}{L}; \\ \omega_0^2 A + 2\delta B + \omega_0^2 C &= 0; \\ B + D &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$A = \frac{U_m R}{2\delta L} = U_m; B = 0; C = -U_m; D = 0.$$

Таким образом, изображение отклика

$$u_{\text{вых}}(p) = U_m \left(\frac{p}{p^2 + \omega_0^2} - \frac{p}{p^2 + 2\delta p + \omega_0^2} \right),$$

а его оригинал, согласно табл. 1,

$$u_{\text{вых}}(t) = U_m \left[\cos \omega_0 t - \left(\cos \omega_1 t - \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right) e^{-\alpha t} \right],$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — частота собственных затухающих колебаний контура с потерями. При типовых значениях добротности контура $\frac{\omega_0 L}{R} \gg 1$ можно принять

$\delta \ll \omega_0$ и $\omega_1 \approx \omega_0$. Тогда, пренебрегая вторым слагаемым в круглых скобках последнего выражения, получим:

$$u_{\text{вых}}(t) \approx U_m (1 - e^{-\delta t}) \cos \omega_0 t.$$

Эта функция описывает нестационарный режим работы измерительного преобразователя, показанный на рис. 20. С течением времени он переходит в стационарный режим гармонического колебания с амплитудой U_m и частотой ω_0 . Скорость нарастания амплитуды в нестационарном режиме

$$\frac{d}{dt} U_m (1 - e^{-\delta t}) = U_m \delta e^{-\delta t}$$

постепенно уменьшается от максимального значения $U_m \delta$ в начальный момент времени до нуля. Выход на стационарный режим считается законченным после того, как амплитуда достигнет значения, отличающегося от U_m не более чем на 5%. Записав это условие в виде

$$U_m - U_m (1 - e^{-\delta t_n}) = 0,05 U_m,$$

получим:

$$e^{\delta t_n} = 20,$$

из чего следует, что продолжительность нестационарного режима

$$t_n = \frac{3}{\delta}.$$

Коэффициент затухания δ связан с шириной резонансной характеристики контура на уровне 0,707 (шириной полосы пропускания Δf) соотношением:

$$\delta = \frac{\Delta \omega}{2} = \pi \cdot \Delta f.$$

Отсюда

$$t_n \approx \frac{1}{\Delta f},$$

т. е. чем шире полоса пропускания контура, тем короче нестационарный режим, тем менее искажается отклик по сравнению с входным воздействием.

Нестационарный режим работы средства измерений не всегда переходит в стационарный. Если параметры входного воздействия меняются во времени, средство измерений может постоянно работать в нестационарном режиме.

2.5. Статические и динамические измерения

Рассмотренные выше режимы работы средств измерений приведены на рис. 22.

Измерения постоянных величин в установившемся режиме, а также измерения в стационарном режиме параметров протекающих во времени процессов относятся к *статическим*. Измерения постоянных величин в переходном режиме;

меняющихся во времени величин в стационарном режиме, а также любые изменения в нестационарном режиме, как самих величин, так и параметров протекающих во времени процессов, относятся к *динамическим*.



Рис. 22. Связь между характером измерений и режимами работы средств измерений

При статических измерениях имеется возможность воспользоваться градуировкой шкалы отчетного устройства по известным входным воздействиям (значениям самой измеряемой величины либо значениям параметров протекающих во времени процессов). Связь между входным воздействием и откликом на него устанавливается *функцией преобразования* средств измерений (см. п. 1.2).

При динамических измерениях существенную роль могут играть инерционные свойства средства измерений. Они учитываются его *динамическими характеристиками*, которые могут быть полными и частными.

Полные динамические характеристики исчерпывающим образом описывают инерционные свойства средства измерений. К ним относятся:

- уравнение динамики;
- передаточная функция;
- комплексный коэффициент преобразования (совокупность амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик);
- переходная характеристика;
- импульсная характеристика.

Частные динамические характеристики отражают лишь некоторые инерционные свойства средств измерений. Это отдельные параметры полных динамических характеристик или некоторые величины, определяющие динамику протекания процессов: время установления показаний, ширина полосы пропускания частот и др.

На динамические характеристики средств измерений (полные и частные) устанавливаются нормы. Соответствие динамических характеристик этим нормам проверяется при поверке средств измерений. С этой целью в качестве входных воздействий используются так называемые *испытательные сигналы*, теоретические модели которых представлены в табл. 1.

Наиболее распространенными испытательными сигналами являются:

- единичная ступень (рис. 23);
- единичный импульс (рис. 24);
- монохроматическое колебание (рис. 25).

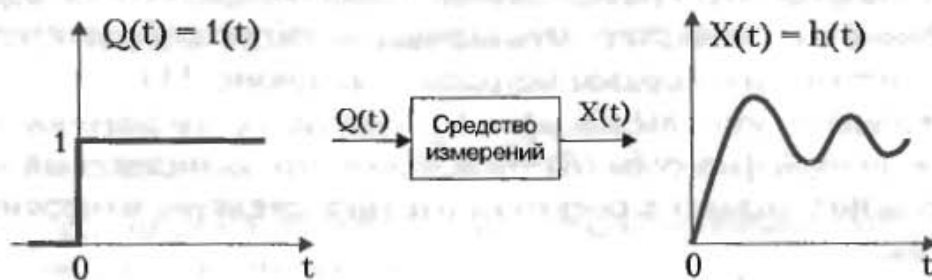


Рис. 23. Единичная ступень и отклик на нее на выходе средства измерений (пример)

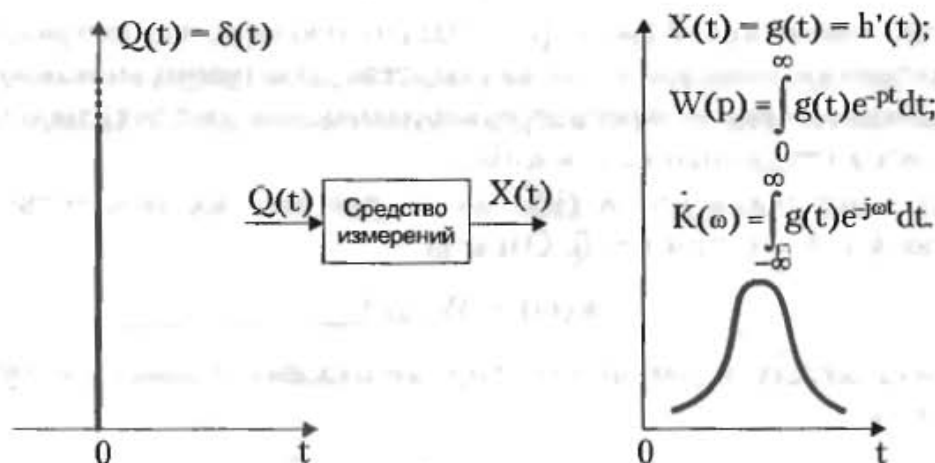


Рис. 24. Единичный импульс и различные формы представления отклика на него



Рис. 25. Прохождение гармонического сигнала через средство измерений

Переходная характеристика $h(t)$ экспериментально определяется как отклик средства измерений на входное воздействие в виде единичной ступени.

Импульсная характеристика $g(t)$ определяется экспериментально как отклик средства измерений на входное воздействие в виде единичного импульса.

Как уже отмечалось, единичный импульс является первой производной от единичной ступени. У линейных средств измерений соотношение между откликами остается таким же, как между входными воздействиями. Поэтому

$$g(t) = h'(t).$$

Подставляя в формулу (5) изображение единичного импульса $Q(p) = \delta(p) = -1$ (см. табл. 1), с помощью первой формулы (4) нетрудно убедиться в том, что передаточная функция является изображением отклика средства измерений на единичный импульс:

$$W(p) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-pt} dt. \quad (8)$$

На этом основывается экспериментальный способ определения передаточной функции. Кроме того, она может быть вычислена теоретически путем решения уравнения динамики операторным методом (см. пример 11).

Спектр единичного импульса $\delta(\omega) = 1$. Подставляя это значение в формулу (7), с помощью первой формулы (6) убеждаемся, что комплексный коэффициент преобразования является спектром отклика средства измерений на единичный импульс:

$$\dot{K}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (9)$$

Амплитудно-частотную $K(\omega)$ и фазо-частотную $\varphi(\omega)$ характеристики можно построить по точкам, подавая на вход средства измерений монохроматические колебания разных частот ω_i и регистрируя изменение амплитуды и фазовую задержку отклика в стационарном режиме.

Сравнивая выражения (8) и (9), легко заметить их тождественность при $p = j\omega$, так как $g(t) = 0$ при $t < 0$. Отсюда

$$\dot{K}(\omega) = W(j\omega).$$

Взаимосвязь между различными динамическими характеристиками представлена табл. 3.

Таблица 3

•	$h(t)$	$g(t)$	$W(p)$	$\dot{K}(\omega)$
$h(t)$	•	$\int_0^t g(t)dt$	$L^{-1}\left[\frac{1}{p}W(p)\right]$	$\Phi^{-1}\left[\frac{1}{j\omega}\dot{K}(\omega)\right]$
$g(t)$	$h'(t)$	•	$L^{-1}[W(p)]$	$\Phi^{-1}[\dot{K}(\omega)]$
$W(p)$	$L[h'(t)]$	$L[g(t)]$	•	$\dot{K}(j\omega)$
$\dot{K}(\omega)$	$\Phi[h'(t)]$	$\Phi[g(t)]$	$W(j\omega)$	•

При экспериментальном определении динамических характеристик приходится считаться с тем, что реальные испытательные сигналы несколько отличаются от их теоретических моделей. Возможно, наиболее точное воспроизведение испытательных сигналов составляет главную проблему метрологического обеспечения динамических измерений.

Важную роль при динамических измерениях играют *искажения* отклика по сравнению с входным воздействием. Под искажениями понимаются любые изменения формы входного воздействия. Изменение масштаба, а также задержка отклика на время τ по сравнению с входным воздействием не относятся к искажениям. Поэтому условие преобразования средством измерений входного воздействия без искажений можно записать следующим образом:

$$X(t) = K_0 Q(t - \tau),$$

где $K_0 = \text{const}$. В операторной форме, согласно табл. 1,

$$X(p) = K_0 Q(p) e^{-p\tau},$$

откуда следует, что средством измерений будет осуществляться преобразование входного воздействия без искажений, если его передаточная функция

$$W(p) = K_0 e^{-p\tau}. \quad (10)$$

Положив $p = j\omega$, можно получить условие преобразования входного воздействия без искажений в другом виде:

$$K(\omega) = K_0 e^{-j\omega\tau}. \quad (11)$$

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики средства измерений, преобразующего входное воздействие без искажений, показаны на рис. 26.

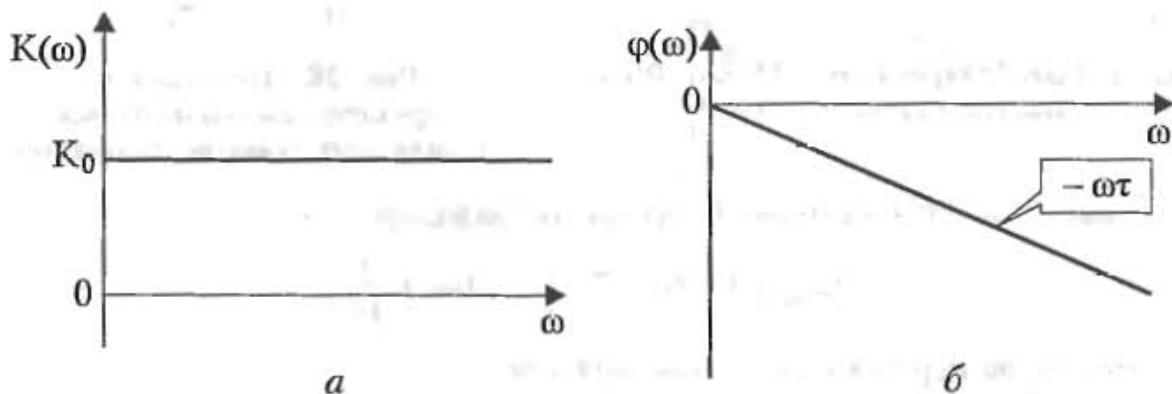


Рис. 26. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики неискажающего измерительного преобразователя

Условия безыскаженного преобразования (10) и (11) справедливы при любом входном воздействии. Соблюдаются они только при отсутствии в средствах измерений реактивных элементов, когда $K_0 = \text{const}$, а $\tau = 0$. На практике для безыскаженного преобразования достаточно, чтобы АЧХ была равномерной, а ФЧХ линейной в полосе частот, занимаемой спектром входного воздействия.

Пример 16

На измерительный преобразователь с идеализированными АЧХ и ФЧХ, показанными на рис. 27 (фильтр нижних частот), подается входное воздействие в форме прямоугольного импульса с высотой U_0 и длительностью τ_n . Исследовать зависимость искажений отклика от ширины полосы пропускания частот измерительного преобразователя.

Решение

1. Представим прямоугольный импульс в виде двух скачков напряжения так, как это показано на рис. 28:

$$u_{\text{вх}}(t) = U_0 \cdot 1(t) - U_0 \cdot 1(t - \tau_n).$$

2. Спектр первого скачка напряжения

$$\dot{u}_{\text{вх}}(\omega) = U_0 \left[\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right].$$

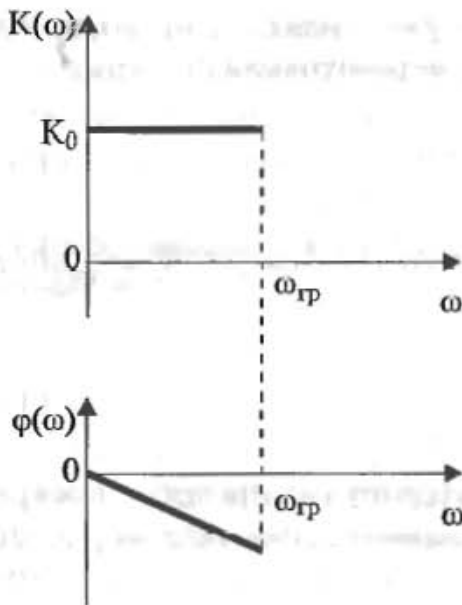


Рис. 27. Идеализированные АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот

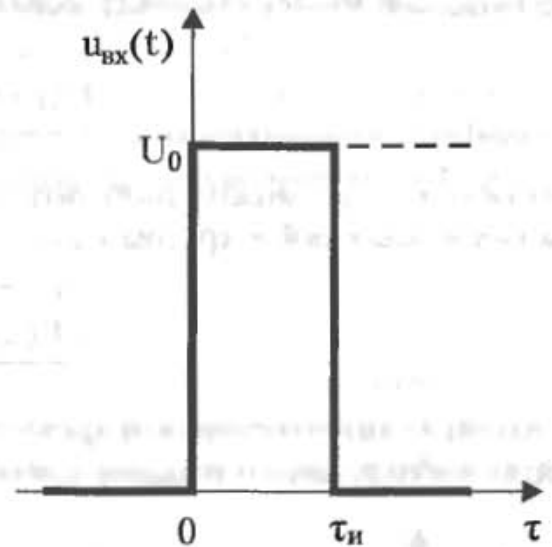


Рис. 28. Представление прямоугольного импульса в виде двух скачков напряжения

3. Спектр отклика на первый скачок напряжения

$$u_{\text{вых}_1}(\omega) = K_0 e^{-j\omega\tau} \cdot U_0 \left[\pi\delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right].$$

4. Отклик на первый скачок напряжения

$$u_{\text{вых}_1}(t) = \frac{K_0 U_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} \left[\pi\delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right] e^{j\omega t} d\omega = K_0 U_0 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_{\text{гр}}} \frac{\sin\omega(t-\tau)}{\omega} d\omega \right].$$

Введем в рассмотрение интегральный синус:

$$\text{Si}(x) = \int_0^x \frac{\sin x}{x} dx,$$

графическое представление которого представлено на рис. 29. Тогда подстановкой $\omega = (t - \tau) = x$ последнее выражение можно привести к виду:

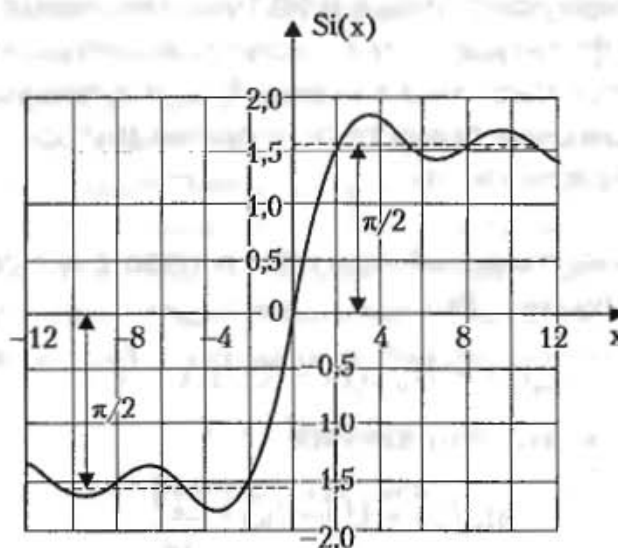


Рис. 29. Функция Si(x)

$$u_{\text{вых}_1}(t) = K_0 U_0 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_{\text{гр}}(t-\tau)} \frac{\sin x}{x} dx \right] =$$

$$= K_0 U_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t-\tau)) \right).$$

Графически этот результат показан на рис. 30. Осцилляции функции, нанесенные пунктиром, не имеют физического смысла, так что можно считать, что отклик начинается в точке А.

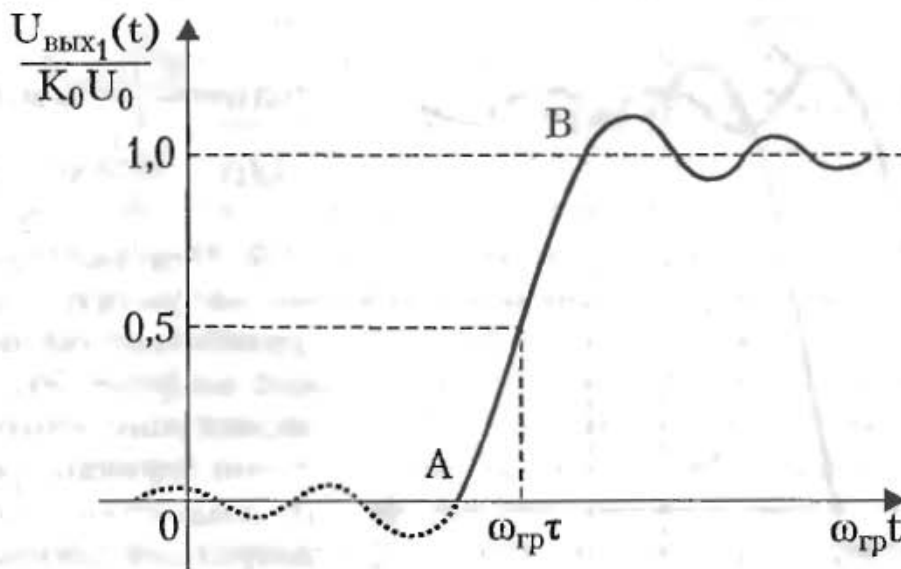


Рис. 30. Отклик идеального фильтра низких частот на положительный скачок напряжения

5. В точках А и В соответственно

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t_A - \tau)) = 0;$$

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t_B - \tau)) = 1.$$

Следовательно,

$$\text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t_A - \tau)) = -\frac{\pi}{2};$$

$$\text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t_B - \tau)) = \frac{\pi}{2}.$$

Используя таблицы интегрального синуса, можно получить:

$$\omega_{\text{гр}}(t_A - \tau) = -1,92;$$

$$\omega_{\text{гр}}(t_B - \tau) = 1,92,$$

откуда длительность переднего фронта отклика

$$t_B - t_A = \frac{3,84}{\omega_{\text{гр}}} = \frac{0,611}{f_{\text{гр}}}.$$

Искажение отклика по сравнению с входным воздействием проявляется в «завале» фронта и осцилляции вершины импульса. Длительность фронта тем меньше, чем шире окно прозрачности (полоса пропускания частот) измерительного преобразователя.

6. Повторив выкладки для второго скачка напряжения на входе, получим окончательное выражение для отклика:

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{K_0 U_0}{\pi} \{ \text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t - \tau)) - \text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t - \tau - \tau_{\text{и}})) \}.$$

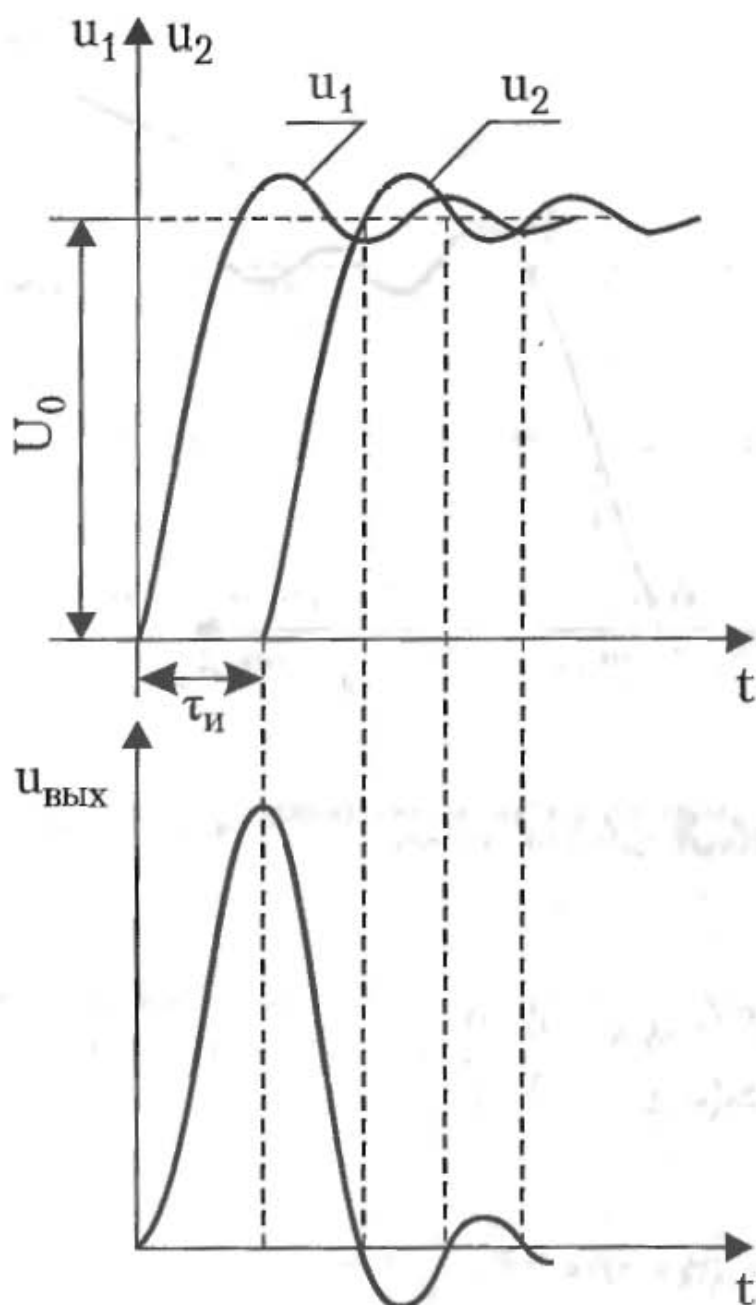


Рис. 31. Графическое построение отклика идеального фильтра нижних частот на прямоугольный импульс

Графическое решение этого уравнения приведено на рис. 31, где

$$u_1(t) = \frac{K_0 U_0}{\pi} \text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t - \tau));$$

$$u_2(t) = \frac{K_0 U_0}{\pi} \text{Si}(\omega_{\text{гр}}(t - \tau - \tau_{\text{и}})).$$

7. Чем уже полоса пропускания фильтра, тем позже фронты отклика на прямоугольный импульс. Это может привести к тому, что отклик не достигнет верхнего уровня входного воздействия. Если принять допустимой длительность фронта, равную 20 % длительности импульса, то необходимым условием этого будет соблюдение неравенства:

$$f_{\text{гр}} \geq \frac{0,611}{0,2\tau_{\text{и}}} \approx \frac{3}{\tau_{\text{и}}}.$$

При ориентировочных расчетах считают, что удовлетворительное преобразование прямоугольного импульса обеспечивается уже при

$$f_{\text{гр}} \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}}.$$

В пределах этой полосы частот сосредоточена главная энерго-несущая часть спектра прямоугольного импульса (рис. 32). Таким образом, можно сказать, что искажения отклика по сравнению с входным воздействием будут незначительными, если спектр входного воздействия согласован с полосой пропускания средства измерений.

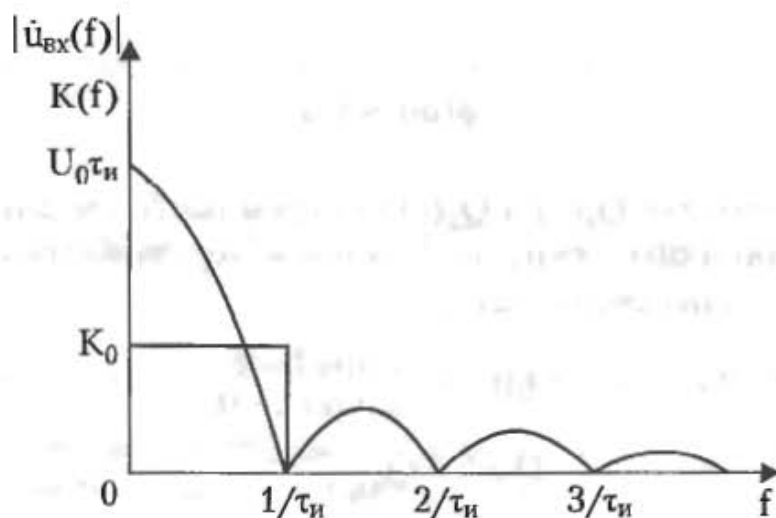


Рис. 32. Спектр входного воздействия (прямоугольного импульса), согласованный (приблизительно) с полосой пропускания средства измерений (идеального фильтра нижних частот)

Статические измерения обеспечивают, как правило, большую точность, чем динамические. Поэтому в тех случаях, когда это возможно, следует проводить измерения в установившемся или стационарном режиме. При динамических измерениях желательно (но не обязательно), чтобы полоса пропускания средств измерений была согласована со спектром входного воздействия. Это позволяет во многих случаях пренебрегать искажениями отклика по сравнению с входным воздействием и значительно упрощает обработку результатов измерений.

Если искажениями отклика, вызванными безвозвратной потерей информации из-за узкой полосы пропускания средства измерений пренебречь нельзя, то при решении обратной задачи динамики можно ограничиться оценкой искажения $\zeta(t)$ входного воздействия $Q(t)$ сверху и снизу. Для этого, учитывая априорную информацию о скорости изменения физической величины во времени, нужно выбрать такие модели входных воздействий $Q_1(t)$ и $Q_2(t)$, при которых искажения

$$\zeta_1(t) = Q_1(t) - X_1(t);$$

$$\zeta_2(t) = Q_2(t) - X_2(t)$$

будут заведомо больше и меньше $\zeta(t)$ ¹. Отклики $X_1(t)$ и $X_2(t)$ на выбранные модели входных воздействий рассчитываются методом интеграла Дюамеля или с помощью известных динамических характеристик. Тогда

$$\zeta_1(t) > \zeta(t) = Q(t) - X(t) > \zeta_2(t). \quad (12)$$

Пример 17

Исследовать прохождение импульса произвольной формы, имеющего длительность τ_n , через измерительный преобразователь (полосовой фильтр) с АЧХ

$$K(\omega) = e^{-\alpha^2 \omega^2}$$

¹ Для простоты функция преобразования принята равной 1.

и ФЧХ

$$\varphi(\omega) = k\omega.$$

Решение

1. В качестве моделей $Q_1(t)$ и $Q_2(t)$ выберем наиболее динамичное входное воздействие — единичный импульс — и наименее динамичное — импульс колокольной формы длительностью τ_n :

$$Q_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0; \\ \infty & \text{при } t = 0. \end{cases}$$

$$Q_2(t) = Q_{2m} e^{-\beta^2 t^2}.$$

Длительность импульса колокольной формы τ_n будем условно определять по достижении $Q_2(t)$ некоторого уровня

$$Q_{20} = Q_{2m} e^{-\beta^2 \tau_n^2}.$$

Отсюда

$$e^{\beta^2 \tau_n^2} = \frac{Q_{2m}}{Q_{20}}.$$

Прологарифмировав левую и правую части этого равенства, получим:

$$\beta^2 \tau_n^2 = \ln \frac{Q_{2m}}{Q_{20}}.$$

Для простоты будем отсчитывать τ_n на таком уровне Q_{20} , чтобы $\frac{Q_{2m}}{Q_{20}} = e$. Тогда

где $\beta^2 = \frac{1}{\tau_n^2}$ и

$$Q_2(t) = Q_{2m} e^{-\frac{t^2}{\tau_n^2}}.$$

Выберем $Q_{2m} = 1$. Тогда окончательные выражения для моделей входных воздействий будут иметь вид:

$$Q_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0; \\ \infty & \text{при } t = 0, \end{cases}$$

$$Q_2(t) = e^{-\frac{t^2}{\tau_n^2}}.$$

2. Откликом $X_1(t)$ на единичный импульс является импульсная характеристика $g(t)$, связанная с комплексным коэффициентом преобразования $\dot{K}(\omega)$ обратным преобразованием Фурье (см. табл. 3). В нашем случае

$$\dot{K}(\omega) = K(\omega) e^{-j\varphi(\omega)} = e^{-\alpha^2 \omega^2 - jk\omega},$$

поэтому

$$X_1(t) = g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha^2 \omega^2 - jk\omega} e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha^2 \omega^2 - j(t-k)\omega} d\omega. \quad (13)$$

Добавим к показателю экспоненты и вычтем из него слагаемое $\frac{(t-k)^2}{4\alpha^2}$. Получим

$$X_1(t) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{(t-k)^2}{4\alpha^2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\alpha\omega + j\frac{t-k}{2\alpha}\right)^2} d\omega. \quad (14)$$

Подстановкой $\alpha\omega + j\frac{t-k}{2\alpha} = x$; $d\omega = \frac{1}{\alpha} dx$ и заменой интеграла в бесконечных пределах на два интеграла в пределах от нуля до бесконечности последнее выражение приводится к виду:

$$X_1(t) = \frac{1}{\alpha\pi} e^{-\frac{(t-k)^2}{4\alpha^2}} \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx,$$

где табличный интеграл равен $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$. Окончательно получим:

$$X_1(t) = \frac{1}{2\alpha\sqrt{\pi}} e^{-\frac{(t-k)^2}{4\alpha^2}}.$$

Единичный импульс на выходе измерительного преобразователя задерживается на время $t = k$, уменьшается по величине и приобретает колокольную форму. Верхняя граница в формуле (12) определяется как

$$\zeta_1(t) = X_1(t) - Q_1(t) = \frac{1}{2\alpha\sqrt{\pi}} e^{-\frac{(t-k)^2}{4\alpha^2}} - 0 \Big|_{t>0}.$$

На рис. 33 она имеет вид кривой колокольной формы.

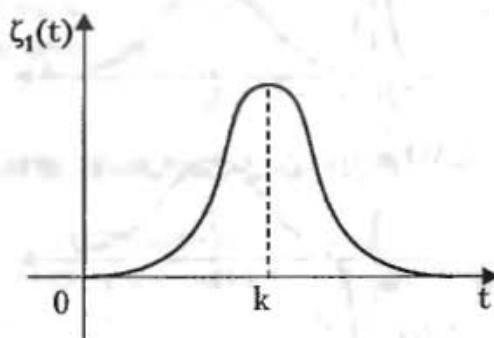


Рис. 33. Верхняя граница $\zeta_1(t)$ в формуле (12)

3. Спектр колокольного импульса $Q_2(t)$

$$Q_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{\tau_n^2}} e^{-j\omega t} dt$$

вычисляется теми же приемами, что и $X_1(t)$ в выражениях (13, 14):

$$Q_2(\omega) = \tau_n \sqrt{\pi} e^{-\frac{\tau_n^2 \omega^2}{4}}.$$

Спектр отклика на такое входное воздействие

$$\dot{X}_2(\omega) = \dot{K}(\omega) \dot{Q}_2(\omega) = e^{-\alpha^2 \omega^2 - jk\omega} \tau_{\text{и}} \sqrt{\pi} e^{-\gamma^2 \omega^2 - jk\omega},$$

где $\gamma^2 = \alpha^2 + \frac{\tau_{\text{и}}^2}{4}$, а сам отклик

$$X_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}_2(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{\tau_{\text{и}}}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\gamma^2 \omega^2 - j(t-k)\omega} d\omega. \quad (15)$$

Из сравнения формул (13) и (15) следует, что

$$X_2(t) = \frac{\tau_{\text{и}}}{2\sqrt{\alpha^2 + \frac{\tau_{\text{и}}^2}{4}}} e^{-\frac{(t-k)^2}{4\alpha^2 + \tau_{\text{и}}^2}}.$$

Таким образом, после прохождения через полосовой фильтр импульс, оставаясь колокольным, несколько расширяется, уменьшается по величине и задерживается во времени. Нижняя граница в формуле (12) определяется как

$$\zeta_2(t) = X_2(t) - Q_2(t) = \frac{\tau_{\text{и}}}{2\sqrt{\alpha^2 + \frac{\tau_{\text{и}}^2}{4}}} e^{-\frac{(t-k)^2}{4\alpha^2 + \tau_{\text{и}}^2}} - e^{-\frac{t^2}{\tau_{\text{и}}^2}}.$$

Вспомогательные построения и вид кривой $\zeta_2(t)$ показаны на рис. 34.

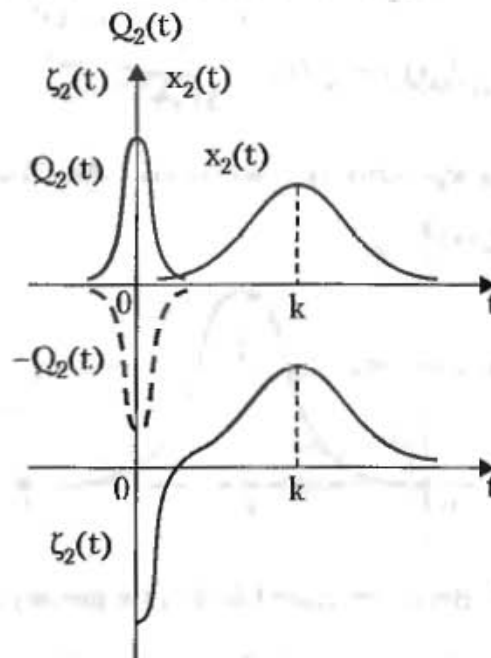
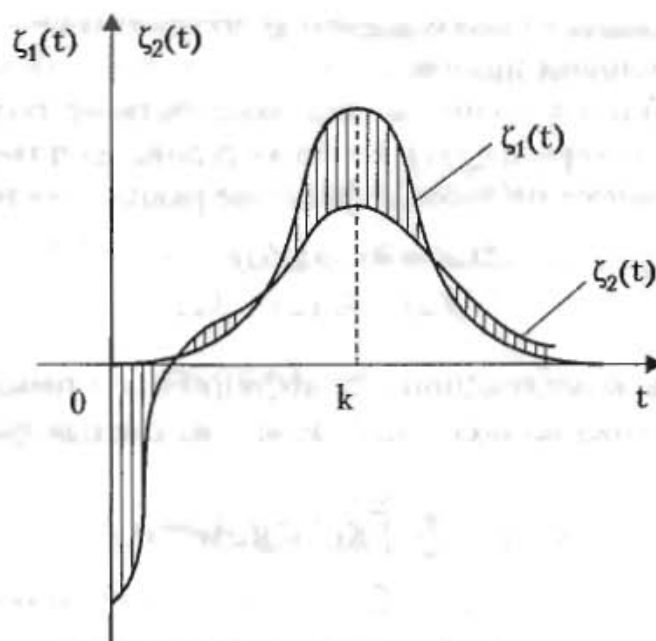


Рис. 34. Определение нижней границы $\zeta_2(t)$ в формуле (12)

4. На рис. 35 представлены графики функций $\zeta_1(t)$ и $\zeta_2(t)$. При восстановлении входного воздействия, имеющего форму импульса неизвестной формы длительностью $\tau_{\text{и}}$, по отклику на него на выходе полосового фильтра с АЧХ и ФЧХ, указанными в условиях примера, нужно будет исходить из того, что входное воздействие $Q(t)$ будет отличаться от отклика $X(t)$ на

$$\zeta(t) = Q(t) - X(t),$$

где $\zeta_1(t) > \zeta(t) > \zeta_2(t)$.

Рис. 35. Верхняя и нижняя границы $\zeta(t)$

При $\alpha > 0$, т. е. при расширении полосы пропускания фильтра,

$$X_2(t) \rightarrow e^{-\frac{(t-k)^2}{\tau_n^2}},$$

степень расширения колокольного импульса уменьшается, а задержка во времени остается прежней.

При $\alpha = 0$ и $k = 0$ импульс проходит без задержки и искажения; в этом случае $\zeta_2(t) = 0$.

При сужении полосы пропускания фильтра, т. е. при увеличении α , искажение колокольного импульса увеличивается, сам импульс уменьшается, а интервал $[\zeta_1(t); \zeta_2(t)]$ расширяется.

2.6. Оптимальная фильтрация

В части I (см. п. 5.1) уже отмечалось, что согласование полосы пропускания фильтра в индикаторе со спектром входного воздействия имеет большое значение при обнаружении полезных сигналов на фоне шумовых помех. В теории индикатора задача ставится так: присутствует на выходе фильтра в

$$X(t) = X(t) + N(t).$$

полезный сигнал $X(t)$, являющийся откликом на входное воздействие $Q(t)$, или входное воздействие $Q(t)$ и отклик на него $X(t)$ равны нулю, а $X(t)$ представляет собой случайную помеху $N(t)$?

Для ответа на поставленный вопрос нужно в первую очередь обеспечить, чтобы полезный сигнал $X(t)$, если он есть, как можно более четко проявился. Эту задачу выделения (селекции) полезного сигнала как раз и решает селективный фильтр (см. рис. 44 в части I). Для того чтобы определить каким он должен быть, зададимся моделью помехи. Будем считать, что помеха представляет собой нормальный случайный процесс со средним значением, равным нулю, и равномерным энергетическим спектром $G_n(\omega) = G_0 = \text{const}$. Такая

модель помехи называется *белым шумом* и соответствует, например, наличию на входе фильтра тепловых шумов.

Пусть на вход фильтра кроме помехи воздействует полезный сигнал $Q(t)$, комплексный спектр которого $\dot{Q}(\omega)$. Спектр отклика на полезный сигнал и энергетический спектр помехи на выходе фильтры равны соответственно

$$\begin{aligned}\dot{X}(\omega) &= \dot{K}(\omega) \dot{Q}(\omega); \\ G_N(\omega) &= K^2(\omega) G_{\gamma}(\omega),\end{aligned}$$

где $K(\omega)$ — модуль комплексного коэффициента преобразования фильтра $\dot{K}(\omega)$. Мощность отклика на полезный сигнал на выходе фильтра

$$X^2(t) = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(\omega) \dot{Q}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right]^2,$$

а эффективная мощность помехи, равная ее дисперсии,

$$\sigma_N^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_N(\omega) d\omega = \frac{G_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K^2(\omega) d\omega.$$

Фильтр наилучшим образом решит задачу выделения полезного сигнала, если в какой-нибудь момент времени t_0 максимизирует отношение пиковой мощности сигнала к эффективной мощности помехи:

$$\frac{X^2(t_0)}{\sigma_N^2} = \frac{1}{2\pi G_0} \cdot \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(\omega) \dot{Q}(\omega) e^{j\omega t_0} d\omega \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} K^2(\omega) d\omega} = \max.$$

Синтезированный по этому критерию фильтр называется *оптимальным*. Для определения его основной метрологической характеристики — комплексного коэффициента преобразования — воспользуемся неравенством Буняковского–Шварца:

$$\left[\int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(\omega) \dot{B}(\omega) d\omega \right]^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} A^2(\omega) d\omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} B^2(\omega) d\omega,$$

которое переходит в равенство при $\dot{A}(\omega) \dot{B}(\omega) = cA^2(\omega)$, где $c = \text{const}$. Согласно этому неравенству

$$\left[\int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(\omega) \dot{Q}(\omega) e^{j\omega t_0} d\omega \right]^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} K^2(\omega) d\omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} Q^2(\omega) d\omega,$$

откуда

$$\frac{X^2(t_0)}{\sigma_N^2} \leq \frac{1}{2\pi G_0} \int_{-\infty}^{\infty} Q^2(\omega) d\omega,$$

причем неравенство переходит в равенство, т. е. отношение пиковой мощности сигнала на выходе фильтра к эффективной мощности помехи максимизируется, если

$$\dot{Q}(\omega)\dot{K}(\omega) = cQ^2(\omega).$$

Здесь $\dot{Q}(\omega) = Q(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$, поэтому условие оптимальности фильтра можно записать в виде:

$$\dot{K}(\omega) = cQ(\omega)e^{-j\varphi(\omega)}e^{-j\omega t_0},$$

или окончательно

$$\dot{K}(\omega) = c \overset{*}{Q}(\omega)e^{-j\omega t_0}, \quad (16)$$

где $\overset{*}{Q}(\omega)$ — комплексно сопряженный спектр входного сигнала.

Полученный результат говорит о том, что динамическая характеристика оптимального фильтра должна быть согласована с входным воздействием. В частности, амплитудно-частотная и фазо-частотные характеристики оптимального фильтра

$$\begin{cases} K(\omega) = cQ(\omega); \\ \psi(\omega) = -\varphi(\omega) - \omega t_0. \end{cases} \quad (17)$$

Справедливо и обратное: любой фильтр оптимален только для одного вида сигналов, имеющих соответствующий спектр.

Пример 18

Построить графики АЧХ и ФЧХ фильтра, оптимального для обнаружения прямоугольного импульса длительностью τ_n .

Решение. Спектр прямоугольного импульса показан на рис. 36, а. Амплитудный и фазовый спектры представлены соответственно на рис. 36, б и в.

АЧХ оптимального фильтра, согласно первой из формул (17), может отличаться от амплитудного спектра входного сигнала только масштабом. Она построена на рис. 36, г.

ФЧХ, соответствующая второй формуле (17), построена на рис. 36, д.

Сравнивая результат, полученный в примере 18, с представленным на рис. 26, можно заключить, что оптимальный фильтр искажает форму входного сигнала. Это накладывает ограничения на области применения оптимальных фильтров. Они предназначены не для измерения меняющихся во времени физических величин по шкале отношений, а для обнаружения слабых сигналов на фоне соизмеримых с ними помех. Оптимальная фильтрация позволяет улучшить отношение сигнал/шум на выходе фильтра по сравнению со входом. Происходит это за счет двух причин. Во-первых, фазо-частотная характеристика оптимального фильтра такова, что в момент t_0 все гармоники полезного сигнала на выходе складываются в фазе. В этом легко убедиться, добавив в выражение

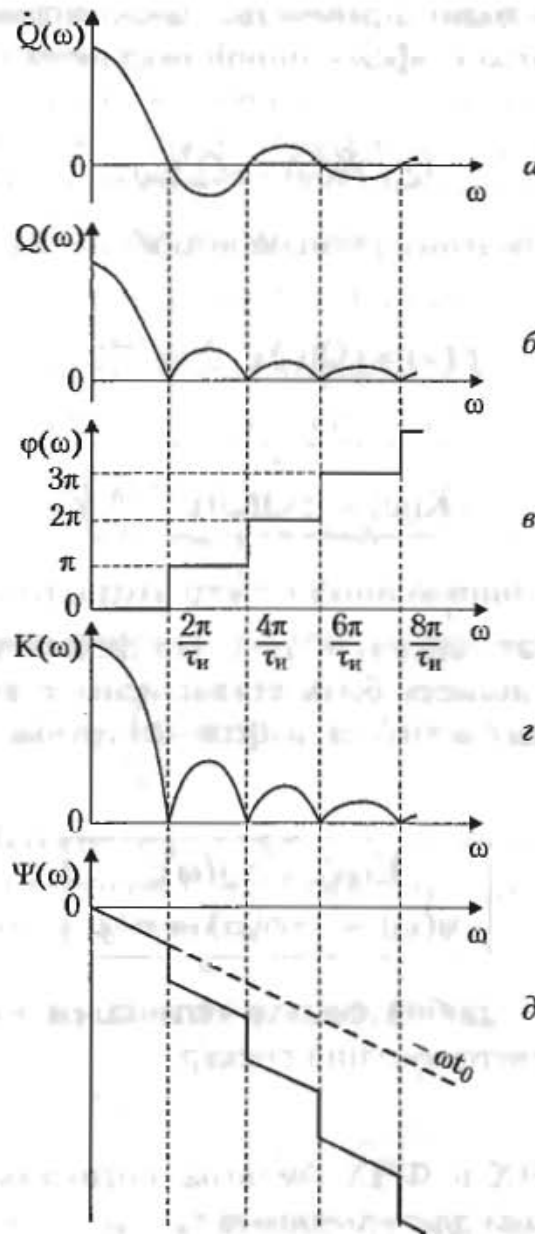


Рис. 36. Построение амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик фильтра, оптимального для обнаружения прямоугольного импульса

для фазы любой гармоники $\Phi(t) = \omega t + \varphi(\omega)$ в момент времени t_0 значение $\Psi(\omega)$ из второй формулы (17):

$$\Phi(t_0) = \omega t_0 + \varphi(\omega) - \varphi(\omega) - \omega t_0 = 0.$$

В результате в момент времени t_0 происходит выброс сигнала; он достигает своего пикового значения. Во-вторых, амплитудно-частотная характеристика оптимального фильтра такова, что подавление основных энергонесущих составляющих полезного сигнала происходит незначительно, в то время как энергия помехи ослабляется существенно (см. рис. 45 и 46 в части I).

Зная динамическую характеристику оптимального фильтра, можно составить его функциональную схему.

Пример 19

Разработать функциональную схему оптимального фильтра, рассмотренного в примере 18.

Решение. Пользуясь табл. 3, определим импульсную характеристику фильтра. Как следует из этой таблицы, она может быть получена обратным преобразованием Фурье выражения (16) и с точностью до постоянного множителя представляет собой прямоугольный импульс, который, как это было показано в примере 16, можно представить в виде разности двух единичных скачков $1(t)$ и $1(t - \tau_n)$, сдвинутых по времени на τ_n . Импульсную характеристику такого вида будет иметь устройство, состоящее из трех функциональных элементов: интегратора, создающего единичный скачок при подаче на его вход единичного импульса, линии задержки на время τ_n и вычитающего устройства. Схема соединения функциональных элементов приведена на рис. 37.

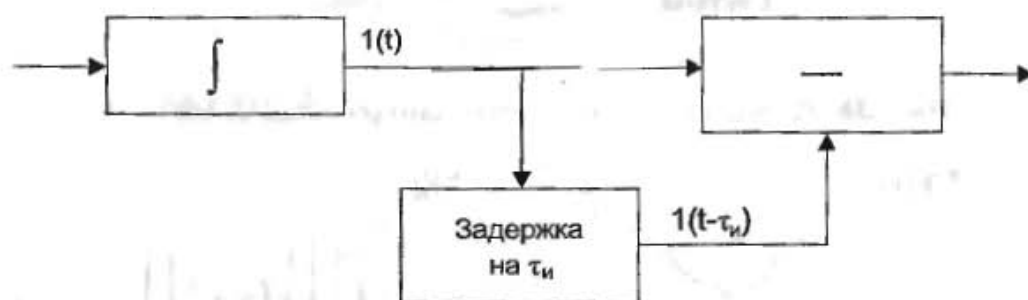


Рис. 37. Функциональная схема фильтра, оптимального для прямоугольного импульса длительностью τ_n

При подаче на вход такого устройства прямоугольного импульса длительностью τ_n на выходе в момент времени t_0 будет обеспечен максимум отношения пиковой мощности сигнала к эффективному значению мощности помехи.

2.7. Передача измерительной информации по каналам связи (основы телеметрии)

2.7.1. Формы представления измерительной информации в измерительных системах

Особое место среди средств измерений занимают *измерительные системы*. От всех прочих средств измерений они отличаются тем, что имеют в своем составе *систему связи*, включающую в себя такие промежуточные измерительные преобразователи, как передающее устройство, канал связи, приемное устройство, а также источники помех, влияющие на работу канала связи (рис. 38). Это влечет за собой необходимость преобразований измерительной информации, обеспечивающих эффективную работу системы связи.

При измерении меняющихся во времени физических величин полезный сигнал на выходе первичного измерительного преобразователя может быть непрерывной (рис. 39, а) или дискретной (рис. 39, б) функцией времени. Форма представления измерительной информации, показанная на рис. 39, а, называется *аналоговой*, а на рис. 39, б — *дискретной*. По каналу связи измерительная информация может передаваться и в той и в другой форме, но системы связи, использующие дискретные сигналы, являются более перспективными, так как имеют лучшие технические характеристики. В связи с этим возникает задача выяснения условий, при которых переход от аналоговой формы представления

измерительной информации к дискретной не сопровождался бы ее потерями или искажениями. В 1933 г. эта задача была решена В. А. Котельниковым для сигналов с ограниченным спектром.



Рис. 38. Функциональная схема измерительной системы

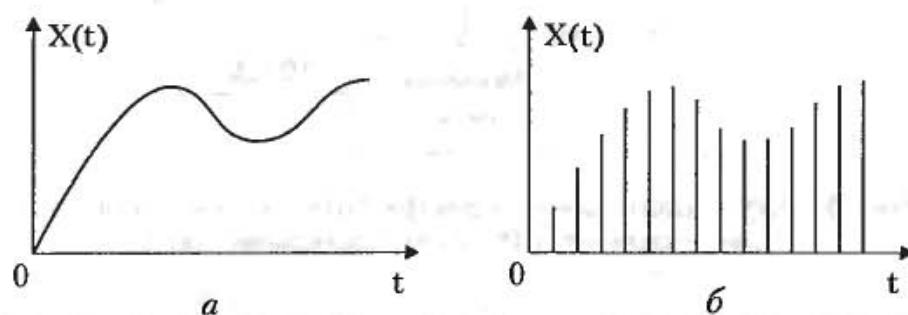


Рис. 39. Аналоговая (а) и дискретная (б) формы представления измерительной информации

Подобно тому, как сигнал длительностью T может быть представлен на этом интервале времени рядом Фурье

$$X(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega t},$$

где

$$\dot{C}_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) e^{-jn\omega t} dt,$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

комплексный спектр сигнала с верхней частотой ω_B в занимаемой им полосе частот от $-\omega_B$ до ω_B может быть представлен рядом

$$\dot{X}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n e^{jn \frac{2\pi}{2\omega_B} \omega},$$

где

$$D_n = \frac{1}{2\omega_B} \int_{-\omega_B}^{\omega_B} \dot{X}(\omega) e^{-jn \frac{\pi}{\omega_B} \omega} d\omega,$$

а $2\omega_B$ играет роль интервала T . Для сигнала с ограниченным спектром обратное преобразование Фурье

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_B}^{\omega_B} \dot{X}(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Сравнивая это выражение с формулой для D_n , можно заметить, что коэффициенты D_n представляют собой умноженные на $\frac{\pi}{\omega_B}$ значения сигнала $X(t)$ в моменты времени $t = -n \frac{\pi}{\omega_B}$:

$$D_n = \frac{\pi}{\omega_B} X\left(-n \frac{\pi}{\omega_B}\right).$$

Указанные моменты разделены равными промежутками времени

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_B} = \frac{\pi}{2\pi f_B} = \frac{1}{2f_B},$$

как это показано на рис. 40.

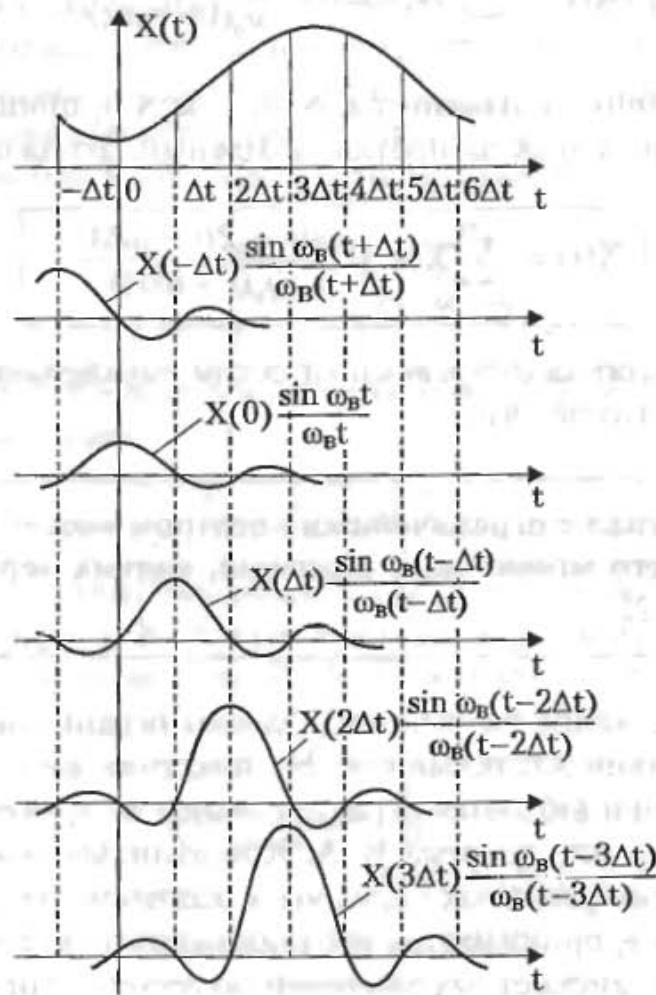


Рис. 40. Разложение непрерывного сигнала в ряд В. А. Котельникова

Подставляя в выражение для $X(t)$ значения $\dot{X}(\omega)$ и D_n , получим:

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_B}^{\omega_B} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_B} X(-n \cdot \Delta t) e^{jn\Delta t \cdot \omega} \right] e^{j\omega t} d\omega.$$

Изменим порядок суммирования и интегрирования:

$$X(t) = \frac{1}{2\omega_B} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(-n \cdot \Delta t) \int_{-\omega_B}^{\omega_B} e^{j\omega(t+n\Delta t)} d\omega.$$

Здесь

$$\int_{-\omega_B}^{\omega_B} e^{j\omega(t+n\Delta t)} d\omega = \frac{e^{j\omega(t+n\Delta t)} \Big|_{-\omega_B}^{\omega_B}}{j(t+n\Delta t)} =$$

$$= \frac{\cos \omega_B(t+n\Delta t) + j \sin \omega_B(t+n\Delta t) - \cos \omega_B(t+n\Delta t) - j \sin \omega_B(t+n\Delta t)}{j(t+n\Delta t)} =$$

$$= 2 \frac{\sin \omega_B(t+n\Delta t)}{t+n\Delta t},$$

поэтому

$$X(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(-n\Delta t) \frac{\sin \omega_B(t+n\Delta t)}{\omega_B(t+n\Delta t)}.$$

Результат суммирования не изменится, если у всех n , принимающих значения от $-\infty$ до $+\infty$, изменить знак на противоположный. Тогда окончательно

$$X(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(n\Delta t) \frac{\sin \omega_B(t-n\Delta t)}{\omega_B(t-n\Delta t)}.$$

Полученный результат является аналитическим выражением *теоремы В. А. Котельникова*. Теорема гласит, что

непрерывный сигнал с ограниченным спектром может быть представлен с помощью его мгновенных значений, взятых через промежутки времени $\Delta t = 1/2f_B$.

Такое представление является точным. Однако ограниченный спектр имеют сигналы неограниченной длительности. На практике же у всех сигналов есть начало и конец, т. е. они являются ограниченными во времени и имеют неограниченный спектр. Для них теорема В. А. Котельникова выполняется приближенно. Так как энергия реальных сигналов в основном сосредоточена в конечной полосе частот, за f_B принимается верхняя частота энергосодержащей части спектра. Общее число дискретных значений получается тогда равным

$$N = \frac{T}{\Delta t} = 2f_B T,$$

где T — длительность сигнала.

На рис. 40 дана графическая интерпретация разложения непрерывного сигнала в ряд В. А. Котельникова. Члены ряда являются ортогональными функциями на бесконечно большом интервале времени. Они равны мгновенному значению сигнала в один из фиксированных моментов времени $n\Delta t$, а во все остальные моменты $k\Delta t$ равны нулю. Таким образом, в каждый из моментов времени $n\Delta t$ ряд вырождается в одно слагаемое. В промежутках между этими моментами члены ряда суммируются.

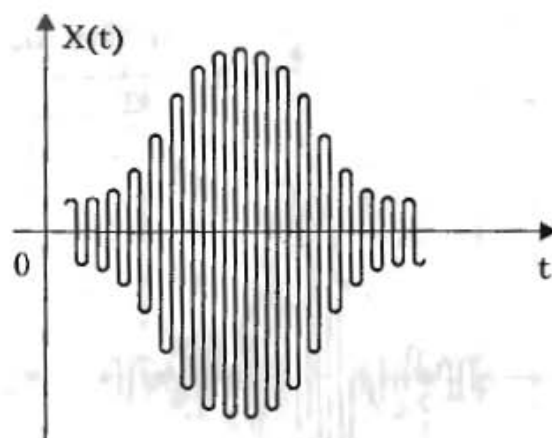


Рис. 41. Сигнал с высокочастотным заполнением

Если сигнал имеет высокочастотное заполнение (рис. 41), то спектр его не содержит низкочастотных составляющих. С хорошим приближением его можно считать ограниченным в полосе частот от f_n до f_b . Теорема В. А. Котельникова в этом случае утверждает, что такой сигнал может быть представлен с помощью мгновенных значений его амплитуды и фазы, взятых через промежутки времени

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f},$$

где $\Delta f = f_b - f_n$. При длительности сигнала, равной T , количество дискретных значений амплитуды и фазы

$$N = \frac{T}{\Delta t} = \Delta f \cdot T,$$

а общее их количество, соответственно, в два раза больше.

Доказательство теоремы В. А. Котельникова в рассматриваемом случае аналогично приведенному выше. Ряд В. А. Котельникова для высокочастотного сигнала имеет вид:

$$X(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A(n\Delta t) \frac{\sin \frac{\Delta\omega}{2}(t - n\Delta t)}{\frac{\Delta\omega}{2}(t - n\Delta t)} \times \\ \times \cos[\omega_0(t - n\Delta t) - \varphi(n\Delta t)],$$

где $A(n\Delta t)$ — значение амплитуды (огibaющей) высокочастотного сигнала в фиксированный момент времени; $\varphi(n\Delta t)$ — значение фазы высокочастотного сигнала в тот же момент времени; $\omega_0 = 2\pi \frac{f_n + f_b}{2}$ — середина полосы частот, занимаемой спектром сигнала. Отдельный член ряда представлен графически на рис. 42.

Применение теоремы В. А. Котельникова позволяет без потери измерительной информации перейти к цифровой форме ее представления в определенные моменты времени. Переход от текущего времени к дискретному называется *квантованием по времени*. Наряду с квантованием по времени в технических системах применяется *квантование по уровню*, тесно связанное с кодированием.

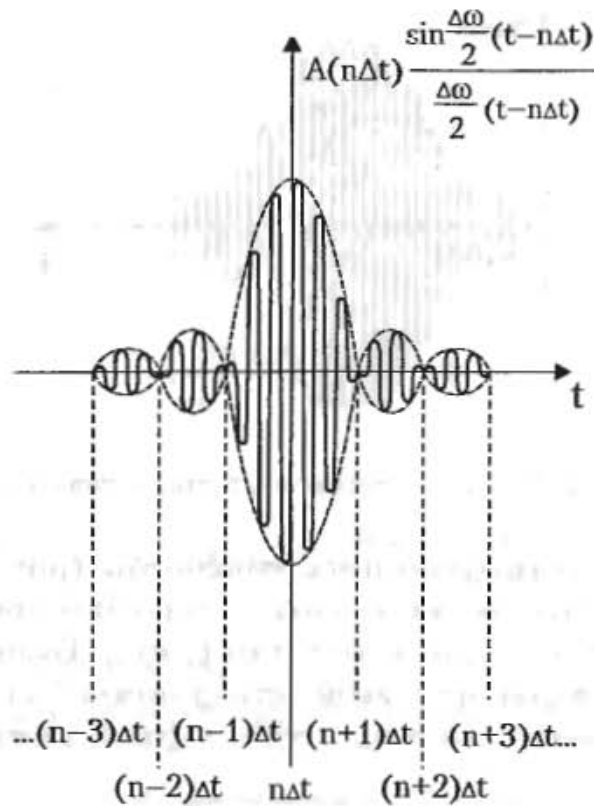


Рис. 42. n -й член ряда В. А. Котельникова для высокочастотного сигнала

2.7.2. Кодирование

В табл. 4 показаны уровни, которые может превысить сигнал на выходе средства измерений. При этом не существенно, является ли он постоянным, меняющимся во времени или его значение выбрано в фиксированный момент времени $n\Delta t$. Измерительная информация заключается в том, какой уровень превышен сигналом. Таким образом, информация о значении сигнала оказывается дискретной. Переход к ней называется *квантованием*, а сами уровни — *уровнями квантования сигнала*. При равных промежутках между уровнями квантование называется *равномерным*, при неравных — *неравномерным*. Наибольшее распространение в технике получило *равномерное квантование по уровню*.

Если будет зафиксировано, что сигнал превысил i -й уровень (но не достиг $i+1$ -го), то его значение

$$X = X_i + \theta,$$

где поправка θ может быть любой в пределах от 0 до $\Delta X = X_{i+1} - X_i$. Ситуационная модель поправки показана на рис. 43.

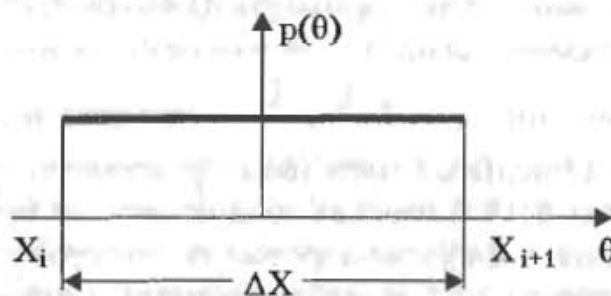


Рис. 43. Ситуационная модель поправки при квантовании

Таблица 4

двоично-десятичный 4-2-2-1	Код				десятич- ный	Уровни квантования
	равномерный		двоичный			
	Грея	Бодо	четырёх- значный	неравно- мерный		
0001	0111	1000	01111	1111	15	
0001	0110	1001	01110	1110	14	
0001	0011	1011	01101	1101	13	
0001	0010	1010	01100	1100	12	
0001	0001	1110	01011	1011	11	
0001	0000	1111	01010	1010	10	
	1111	1101	01001	1001	9	
	1110	1100	01000	1000	8	
	1011	0100	00111	111	7	
	1010	0101	00110	110	6	
	0111	0111	00101	101	5	
	0110	0110	00100	100	4	
	0011	0010	00011	11	3	
	0010	0011	00010	10	2	
	0001	0001	00001	1	1	
	0000	0000	00000	0	0	

Величина ΔX называется *шагом квантования*. Дефицит информации о значении поправки приводит к тому, что значение X становится менее правильным. С учетом поправки

$$\bar{X} = X_i + \frac{\Delta X}{2};$$

$$u_X = \frac{\Delta X}{2\sqrt{3}},$$

где u_X — мера правильности значения X (стандартная неопределенность по типу В). При заданных u_X и диапазоне изменения сигнала от 0 до X_{\max} *число уровней* или *ступеней квантования* определяется по формуле:

$$n = \frac{X_{\max}}{\Delta X} = \frac{X_{\max}}{2u_X\sqrt{3}}.$$

Уровни квантования могут быть обозначены какими-либо символами или пронумерованы, как показано в табл. 4, в десятичной или любой другой системе счисления. Такая операция называется *кодированием*. Символы или цифры представляют собой *кодовые элементы*. В десятичном коде это 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9; в двоичном — 0 и 1. Двоичный код проще десятичного и легче реализуется в технических системах. Поэтому он получил преимущественное распространение.

Любое число в двоичной системе счисления записывается в виде суммы:

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} c_i 2^{i-1},$$

где c_i — цифры двоичной системы счисления (0 или 1), стоящие в соответствующих разрядах; n — число разрядов. Правила суммирования в двоичной системе чрезвычайно просты: $0 + 0 = 0$; $0 + 1 = 1$; $1 + 0 = 1$; $1 + 1 = 10$. Примеры приведены в табл. 4. Так, в частности, число 13 в двоичной системе записывается 1101, что соответствует сумме $1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$.

Из приведенных в табл. 4 примеров видно, что кодовые комбинации (совокупность кодовых элементов) могут иметь одинаковую или неодинаковую *длину*. Соответственно различаются *равномерные* и *неравномерные* коды. Число знаков в кодовой комбинации, равное числу разрядов, определяет *значимость* равномерного кода. Например, пятизначный код Бодо, предназначенный для кодирования букв алфавита, позволяет образовать не 16, как четырехзначный (см. табл. 4), а 32 кодовых комбинации одинаковой длины. Вообще же, максимальное число, кодируемое n -разрядным двоичным кодом,

$$N_{\max} = 2^n - 1.$$

Уровни квантования совсем не обязательно должны кодироваться посредством их нумерации в двоичной системе счисления. В этом случае при переходе сигнала на соседний уровень возможно изменение двоичных кодовых элементов сразу в нескольких разрядах, что повышает вероятность ошибок, называемых *ошибками считывания*. Во избежание таких ошибок применяются правила

образования кодовых комбинаций, при которых соседние комбинации могут отличаться цифрой только в одном разряде. Такие коды получили название *отраженных*. Наиболее распространенным из них является *код Грея* (см. табл. 4), который легко преобразуется в двоичный код по следующему правилу: первая единица со стороны старших разрядов остается без изменения; последующие цифры остаются без изменения, если число единиц слева четно, и инвертируются — если нечетно.

Очень широкое распространение получило двоичное кодирование каждой цифры десятичного числа в отдельности. Так как цифр всего 10, то для этого необходимы 10 кодовых комбинаций. 3-значный двоичный код позволяет образовать их 8, а 4-значный — 16. Таким образом, первый не годится, а второй дает 6 лишних комбинаций. Так как в качестве лишних могут рассматриваться любые 6 из 16 возможных 4-значных комбинаций, то открывается возможность построения большого числа самых разнообразных кодов. Они называются *двоично-десятичными*, причем в названии указываются коэффициенты, на которые нужно умножать соответствующие кодовые элементы для того, чтобы в сумме получалась кодируемая цифра. Так, при использовании кода 4 – 2 – 2 – 1 число 138 будет закодировано в виде 0001 0011 1110, что означает

$$4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 1 = 1;$$

$$4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 = 3;$$

$$4 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 0 = 8.$$

Пример использования этого кода приведен в табл. 4. Как можно заметить, такое кодирование является неоднозначным. Цифра 3 может быть закодирована в виде 0101, цифра 4 — в виде 1000, 5 — в виде 1001 и т. д. Необходимая однозначность достигается только соответствующим построением устройств кодирования и декодирования. Единственным однозначным двоично-десятичным кодом является код 8 – 4 – 2 – 1.

Общее число кодовых комбинаций, которое можно образовать с помощью n -разрядного двоичного кода, составляет

$$N_{\text{кк}} = 2^n.$$

Если все они используются для кодирования измерительной информации, то код называется *простым (примитивным)*. В простых равномерных кодах непреднамеренное изменение одного из кодовых элементов на противоположный приводит к возникновению новой комбинации, т. е. к ошибке. Коды, позволяющие обнаруживать и исправлять ошибки, называются *корректирующими*.

В корректирующих кодах в кодовые комбинации вводят дополнительные (избыточные) кодовые элементы. Длина кодовых комбинаций (число разрядов) увеличивается, но не все разряды используются для кодирования информации. Число *информационных* разрядов k определяет *мощность* $N_p = 2^k$ и избыточность $R = 1 - \frac{k}{n}$ кода. Дополнительные разряды (их называют *проверочными*) служат для обнаружения и исключения ошибок.

Пример 20

Считая многократные ошибки (в нескольких разрядах) маловероятными, построить корректирующий код на базе кода Бодо.

Решение. Введем в код Бодо шестой (проверочный) разряд и будем заполнять его кодовыми элементами так, чтобы число единиц в каждой кодовой комбинации было четным. Тогда при появлении в результате помех или сбоев в аппаратуре кодовых комбинаций с нечетным числом единиц можно будет утверждать, что в них вкралась ошибка.

В рассмотренном примере корректирующий код позволяет обнаружить кодовые комбинации, в которых содержатся однократные или нечетной кратности ошибки, но не позволяет указать, в каком именно разряде. Для решения этой более сложной задачи требуется введение большего числа проверочных разрядов. Рассмотрим эту процедуру на примере построения кода Хэмминга, реализующего идею многократных проверок на четность различных вариантов сумм кодовых элементов в определенных разрядах кодовой комбинации. В результате таких проверок удастся получить номер искаженного разряда в двоичной системе счисления.

Порядок построения кода Хэмминга следующий.

1. Определяется необходимое количество информационных k и проверочных r разрядов. Число проверок в дальнейшем будет равняться числу проверочных разрядов r , а результат каждой проверки будет обозначаться символом 0 или 1. Записанные справа налево символы образуют число в двоичной системе счисления, соответствующее номеру искаженного разряда. Так как это число не может быть меньше k , а число разрядов в нем равно r , то должно выполняться условие

$$2^r - 1 \geq k.$$
2. Все проверки заключаются в вычислении суммы по модулю двух кодовых элементов в соответствующих разрядах кодовой комбинации. При первой проверке выбираются те разряды, двоичный номер которых содержит единицу в первом разряде, т. е. 1, 3, 5, 7, 9-й При второй проверке выбираются разряды, двоичный номер которых содержит 1 во втором разряде, т. е. 2, 3, 6, 7, 10-й При третьей проверке выбираются 4, 5, 6, 7, 12, 13-й ... разряды и т. д.
3. Место расположения проверочных разрядов в кодовой комбинации в принципе может быть произвольным, однако при выбранном правиле проверок проверочные символы (0 или 1) удобнее размещать в разрядах, номера которых равны целой степени числа 2, т. е. в 1, 2, 4, 8-м и т. д.
4. Способ заполнения проверочных разрядов определяется правилом проверки корректирующего кода.

Пример 21

Построить код Хэмминга для чисел от 0 до 15 и воспользоваться им для коррекции кодовой комбинации.

Решение

1. Так как $N_p = 16$, то необходимое число информационных разрядов $k = 4$.
2. Исходя из условия $2^r - 1 \geq k$, необходимое число проверочных разрядов $r = 3$. Код Хэмминга, следовательно, должен иметь $n = k + r = 7$ разрядов.
3. В соответствии с рекомендацией 3 в качестве проверочных удобно выбрать 1, 2 и 4-й разряды. Остальные (информационные) должны использоваться для размещения в них чисел от 0 до 15 в двоичной системе счисления.
4. После заполнения кодовыми элементами информационных и проверочных разрядов получим следующую кодовую таблицу:

Десятичное число	Кодовая комбинация
0	0000000
1	1101001
2	0101010
3	1000011
4	1001100
5	0100101
6	1100110
7	0001111
8	1110000
9	0011001
10	1011010
11	0110011
12	0111100
13	1010101
14	0010110
15	1111111

5. Рассмотрим кодовую комбинацию 0111110. В кодовой таблице ее нет, так что в одном из разрядов допущена ошибка (возможностью многократных ошибок по-прежнему будем пренебрегать). Первая проверка дает $0 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0$; вторая — $1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 1$; третья — $1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 1$. Записывая результаты проверок справа налево, устанавливаем, что искажен кодовый элемент в 110 (шестом) разряде. Таким образом, правильной является кодовая комбинация 0111100, соответствующая числу 12.

Использование избыточности и применение корректирующих кодов лежит в основе *помехоустойчивого кодирования* и обеспечения достоверности измерительной информации при передаче ее по дискретным каналам связи.

Во многих случаях, кроме того, большое значение имеет *скорость передачи* измерительной информации. Для ее повышения можно отказаться от избыточных кодовых элементов (нулей слева от первой единицы) в каждой кодовой комбинации. Код будет тогда неравномерным. Самыми короткими кодовыми комбинациями нужно закодировать наиболее вероятные значения сигнала, т. е. кодирование должно основываться на учете его статистических закономерностей. Критерием эффективности кода является *средняя длина кодовой комбинации*

$$\ell_{\text{cp}} = \sum_k P_k \ell_k,$$

где суммирование производится по всем кодируемым значениям сигнала; P_k — вероятность k -го значения, а ℓ_k — длина (число разрядов) соответствующей ему кодовой комбинации. Наиболее экономичным (эффективным) является код, средняя длина кодовой комбинации у которого минимальна. Такой код, синтезированный по критерию

$$\sum_k P_k \ell_k = \min,$$

называется *оптимальным*. Он обеспечивает максимальную скорость передачи измерительной информации.

Первые методики построения оптимальных кодов были предложены К. Шенноном и Р. Фэно. Они существенно не отличаются, и соответствующий код получил поэтому название *кода Шеннона–Фэно*. Порядок построения этого кода рассмотрим на примере.

Пример 22

В дискретный канал связи измерительной системы поступает сигнал от промежуточного измерительного преобразователя, подчиняющийся нормированному нормальному закону распределения вероятности. Измерительная информация содержится в корреляционной функции сигнала. Построить код Шеннона–Фэно для передачи значений сигнала после его дискретизации.

Решение

1. Сигнал $X(t)$ в каждый момент времени характеризуется уровнем квантования, который может быть положительным или отрицательным. Разобьем сначала весь диапазон изменения сигнала на 10 равных поддиапазонов, ограниченных пятью положительными и пятью отрицательными уровнями. После этого поддиапазоны, прилегающие к нулевому уровню, дополнительно разобьем пополам. Получим всего 12 поддиапазонов. Вероятность того, что сигнал $X(t)$ окажется в одном из поддиапазонов, равна разности значений функции Лапласа на границах поддиапазона. Например, вероятность того, что сигнал $X(t)$ окажется в поддиапазоне между 4-м и 5-м уровнями, равна $L(5) - L(4) \approx 0,001$; между 1-м и 2-м — $L(2) - L(1) \approx 0,136$; между уровнями 0 и 1/2 — $L(-1/2) - L(0) \approx 0,192$; между уровнями -1 и -1/2 — $L(-1/2) - L(-1) \approx 0,149$ и т. д. Все сформированные поддиапазоны и вероятности того, что сигнал $X(t)$ окажется в каждом из них (в порядке убывания), приведены в табл. 5.

Таблица 5

Поддиапазон между уровнями	Вероятность попадания сигнала в поддиапазон	Деление на группы	Кодовая комбинация
0 ... 0,5	0,192	} I } I	00
0 ... -0,5	0,192	} I } II	01
0,5 ... 1	0,149	} I } I	100
-0,5 ... -1	0,149	} I } II	101
1 ... 2	0,136	} I } I	1100
-1 ... -2	0,136	} I } II	1101
2 ... 3	0,021	} II } I } I	11100
-2 ... -3	0,021	} II } I } II	11101
3 ... 4	0,001	} II } II } I } I	111100
-3 ... -4	0,001	} II } II } I } II	111101
4 ... 5	0,001	} II } II } I } I	111110
-4 ... -5	0,001	} II } II } I } II	111111

2. При построении кода Шеннона–Фэно все возможные варианты сначала делятся на две группы так, чтобы суммы вероятностей в каждой из них были по возможности одинаковы (см. табл. 5). Всем вариантам I группы в качестве первого символа в кодовой комбинации приписывается 0, а вариантам II группы — 1. Затем каждая группа в свою очередь разбивается на две подгруппы с примерно одинаковыми суммарными вероятностями, процедура присвоения символов повторяется и т. д.

Кодовая таблица для рассматриваемого примера представлена первой и последней графами в табл. 5.

Преобразователи аналог-код (АЦП — аналого-цифровые преобразователи) относятся к промежуточным измерительным преобразователям. Их метрологическими характеристиками являются: вид выходного кода, число разрядов кода, цена единицы наименьшего информационного разряда кода ΔX . Все они входят в первую группу метрологических характеристик средств измерений (см. п. 1.2).

2.7.3. Модуляция

Преобразование измерительной информации с целью передачи ее по каналу связи в аналоговой форме называется *модуляцией*. Носителями информации в различных каналах связи могут быть электромагнитные колебания оптического, радио и более низкочастотных диапазонов, акустические колебания и т. п. Они характеризуются такими параметрами, как *амплитуда* колебаний, *частота начальная фаза* или, например, параметрами *поляризации* электромагнитного излучения. Если эти параметры остаются неизменными, то, несмотря на излучение и прием, например, электромагнитных колебаний, никакой передачи информации не происходит. Информация передается тогда, когда изменение (модуляция) одного из параметров отражает ее содержание. Естественно при этом, что на приемном пункте изменение параметра должно быть обратно преобразовано в сигнал, представляющий собой измерительную информацию. Такое обратное преобразование называется *демодуляцией*.

В зависимости от того, за счет изменения какого параметра осуществляется передача информации по каналу связи, различают *амплитудную, частотную, фазовую, поляризационную* и другие виды модуляции. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Амплитудная модуляция

При аналоговой форме представления измерительной информации чаще всего применяется амплитудная модуляция. Если немодулированное несущее колебание имеет вид гармонической функции

$$Y_0(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где A_0 , ω_0 и φ_0 — соответственно амплитуда, круговая частота и начальная фаза этого колебания, то амплитудно-модулированное колебание описывается выражением:

$$Y(t) = [A_0 + X(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $X(t)$ — сигнал на выходе средства измерений, содержащий измерительную информацию. Если, предположим, $X(t) = B \cos \Omega t$, где *частота модуляции* $\Omega \ll \ll \omega_0$, то

$$Y(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

а параметр $m = \frac{B}{A_0} \leq 1$ называется *глубиной модуляции*. Этот пример иллюстрируется рис. 44.

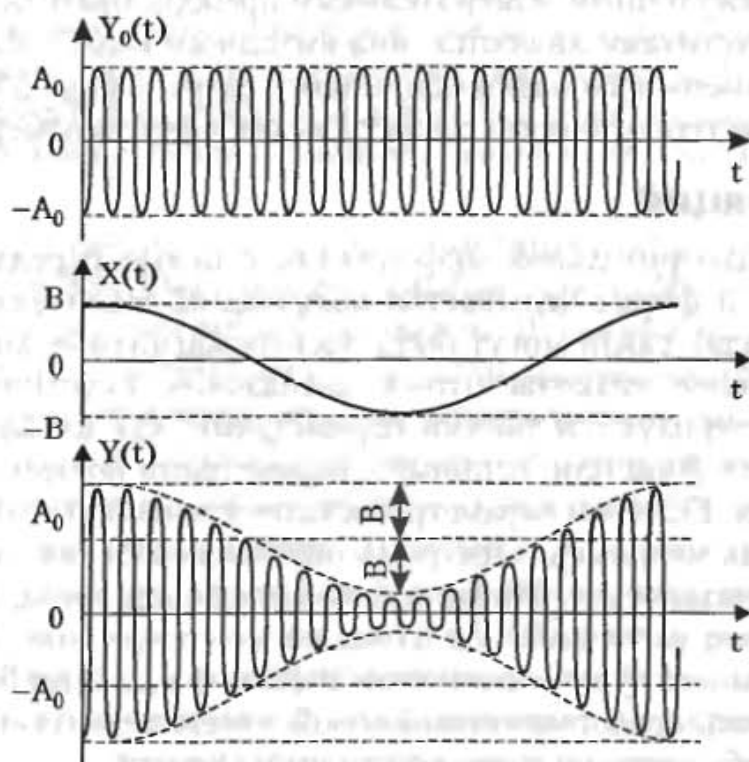


Рис. 44. Немодулированное колебание $Y_0(t)$, модулирующий сигнал $X(t)$ и амплитудно-модулированное колебание $Y(t)$

Спектр амплитудно-модулированного колебания не содержит составляющей на частоте модуляции. В рассматриваемом примере представление о нем можно получить, преобразовав последнее выражение следующим образом:

$$Y(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + m \frac{A_0}{2} \cos((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0) + m \frac{A_0}{2} \cos((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0).$$

Спектр симметричен относительно составляющей на несущей частоте ω_0 и состоит еще из двух составляющих на боковых частотах $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$ с амплитудами $m \frac{A_0}{2}$ (рис. 45). Ширина спектра равна 2Ω , что вдвое превышает ширину спектра модулирующего сигнала $X(t)$.

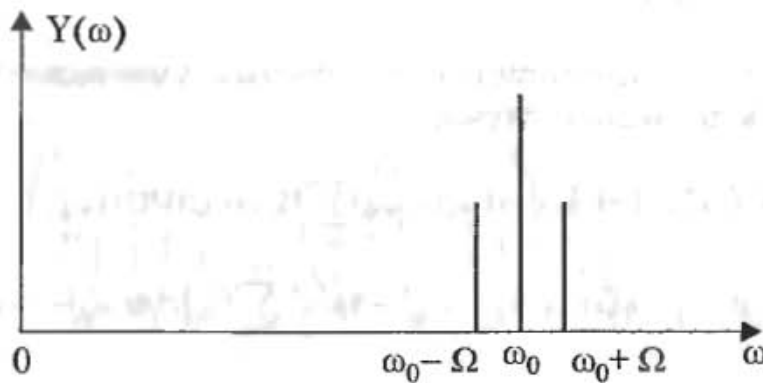


Рис. 45. Спектр амплитудно-модулированного колебания $Y(t)$, показанного на рис. 44

При сложных модулирующих сигналах спектр модулированного колебания получается более богатым. Так, при

$$X(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(n\Omega t + \varphi_n)$$

спектральный состав амплитудно-модулированного колебания определяется выражением:

$$\begin{aligned} Y(t) &= A_0 \left[1 + m \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\Omega t + \varphi_n) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + m \frac{A_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos[(\omega_0 - n\Omega)t + \varphi_0 - \varphi_n] + \\ &+ m \frac{A_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos[(\omega_0 + n\Omega)t + \varphi_0 + \varphi_n]. \end{aligned}$$

Характер такого спектра показан на рис. 46.

Спектральная составляющая на несущей частоте не несет в себе информацию о модулирующем сигнале. Следовательно, на ее передачу по каналу связи непроизводительно расходуется мощность передающего устройства. Для устранения этого недостатка применяется *балансная амплитудная модуляция*, при которой составляющая на несущей частоте в спектре амплитудно-модулированного

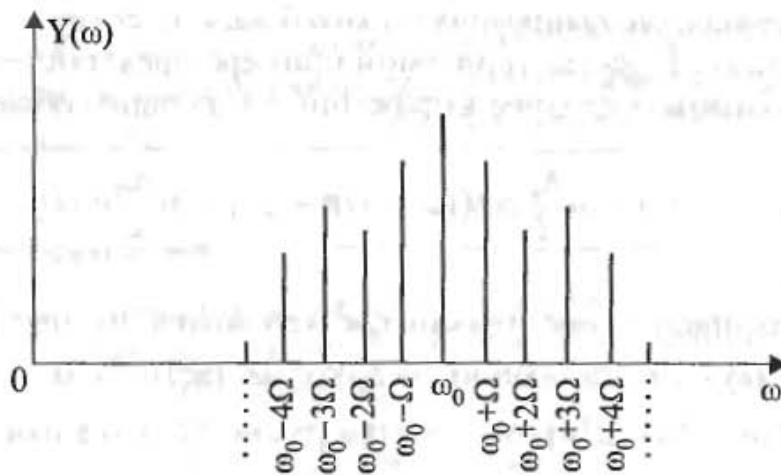


Рис. 46. Спектр амплитудно-модулированного периодическим сигналом колебания

колебания отсутствует. Достигается это прямым умножением $Y_0(t)$ на $X(t)$. Так, в частности, в последнем случае

$$\begin{aligned}
 Y(t) &= Y_0(t)X(t) = A_0 \cos(\omega_0 + \varphi_0) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(n\Omega t + \varphi_n) = \\
 &= m \frac{A_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n [\cos(\omega_0 - n\Omega)t + \varphi_0 - \varphi_n] + m \frac{A_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n [\cos(\omega_0 + n\Omega)t + \varphi_0 + \varphi_n],
 \end{aligned}$$

и спектр амплитудно-модулированного колебания состоит только из составляющих на боковых частотах.

Симметрия спектра амплитудно-модулированного колебания позволяет еще более экономно расходовать мощность передающего устройства. Можно передавать составляющие в спектре, лежащие только по одну из сторон от несущей частоты. В этом случае вдвое сокращается ширина спектра амплитудно-модулированного сигнала, но усложняется аппаратура.

Аппаратурная реализация амплитудной модуляции предполагает выполнение операции умножения. Следовательно, модулятор должен включать в себя аналоговое перемножающее устройство. В линейных цепях с переменными параметрами для этого используются электронные лампы, транзисторы или операционные усилители с управляемым коэффициентом усиления. Другим способом является использование нелинейных элементов, на которые подаются, например, напряжения

$$u_1 = A_0 \cos \omega_0 t;$$

$$u_2 = B \cos \Omega t.$$

Электрический ток в цепи, включающей нелинейный элемент, является функцией этих напряжений, разложив которую в ряд Тейлора по ее аргументам, получим:

$$\begin{aligned}
 i &= f(u_1, u_2) = i_0 + a_1 A_0 \cos \omega_0 t + a_2 B \cos \Omega t + b_{11} A_0^2 \cos^2 \omega_0 t + \\
 &+ 2b_{12} A_0 B \cos \Omega t \cos \omega_0 t + b_{22} B^2 \cos^2 \Omega t + \\
 &+ \dots = i_0 + (a_1 A_0 + 2b_{12} A_0 B \cos \Omega t) \cos \omega_0 t + \dots,
 \end{aligned}$$

где i_0 , a и b — постоянные. Последнее слагаемое, представляющее собой амплитудно-модулированное колебание, может быть выделено резонансным элементом с шириной полосы пропускания, перекрывающей спектр этого колебания.

Частотная модуляция

При частотной модуляции сигнал, содержащий измерительную информацию, меняет частоту модулируемого колебания:

$$Y(t) = A_0 \cos\{\omega_0 + X(t)\} t + \varphi_0\}.$$

Если, например, $X(t) = \Delta\omega \cdot \cos\Omega t$, где Ω — по-прежнему, частота модуляции, а $\Delta\omega$ называется *девиацией частоты*, то

$$Y(t) = A_0 \cos[\omega_0(1 + m \cos\Omega t) t + \varphi_0],$$

где $m = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ — *глубина модуляции частоты*. Этот пример иллюстрирует рис. 47.

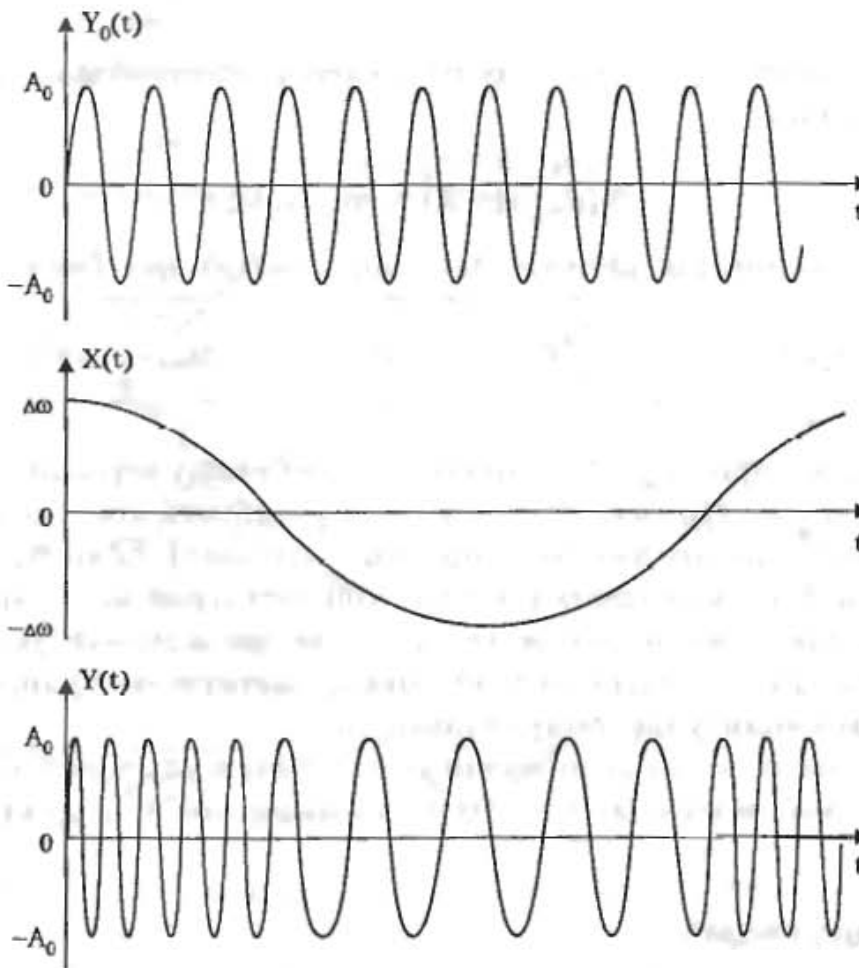


Рис. 47. Немодулированное колебание $Y_0(t)$, модулирующий сигнал $X(t)$ и частотно-модулированное колебание $Y(t)$

Круговая частота по определению представляет собой производную по времени от мгновенной фазы колебания. В рассматриваемом примере она равна $\omega_0(1 + m \cos\Omega t)$. Следовательно, мгновенная фаза

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega_0(1 + m \cos\Omega t) dt = \omega_0 t + m_{\text{чм}} \sin\Omega t,$$

где $m_{\text{чм}} = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$ — *индекс частотной модуляции*.

С учетом начальной фазы

$$Y(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + m_{\text{чм}} \sin \Omega t + \varphi_0).$$

Представление о спектре рассматриваемого частотно-модулированного колебания можно получить, если представить последнее выражение в виде

$$Y(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(m_{\text{чм}} \sin \Omega t) - A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(m_{\text{чм}} \sin \Omega t).$$

В общем случае для его анализа нужно воспользоваться следующими разложениями по функциям Бесселя:

$$\cos(x \sin y) = J_0(x) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(x) \cos 2ny;$$

$$\sin(x \sin y) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(x) \sin(2n+1)y.$$

Для простоты ограничимся случаем малого индекса частотной модуляции $m_{\text{чм}} \ll 1$. Тогда можно принять

$$\begin{aligned} \cos(m_{\text{чм}} \sin \Omega t) &\approx 1; \\ \sin(m_{\text{чм}} \sin \Omega t) &\approx m_{\text{чм}} \sin \Omega t \end{aligned}$$

и записать выражение для частотно-модулированного колебания в виде:

$$Y(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - m_{\text{чм}} \frac{A_0}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega) t + \varphi_0] + m_{\text{чм}} \frac{A_0}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega) t + \varphi_0].$$

Таким образом, при $m_{\text{чм}} \ll 1$ спектр частотно-модулированного колебания не отличается от спектра амплитудно-модулированного колебания, показанного на рис. 45 (при одинаковом модулирующем сигнале). Если условие $m_{\text{чм}} \ll 1$ не выполняется, что характерно для глубокой частотной модуляции, то спектр частотно-модулированного сигнала содержит не две, а гораздо больше боковых частот. В общем случае, следовательно, спектр частотно-модулированного сигнала шире, чем амплитудно-модулированного.

Технически частотно-модулированные колебания получают обычно, воздействуя модулирующим сигналом на один из параметров, определяющих частоту генератора.

Фазовая модуляция

При фазовой модуляции сигналом, содержащим измерительную информацию, изменяется начальная фаза модулируемого колебания

$$Y(t) = A_0 \cos\{\omega_0 t + (\varphi_0 + X(t))\}.$$

Если, по-прежнему, рассматривать гармонический модулирующий сигнал $X(t) = \Delta\varphi \cos \Omega t$, где $\Delta\varphi$ — *девиация фазы*, то

$$Y(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0(1 - m \cos \Omega t)).$$

Здесь $m = \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0}$ — глубина фазовой модуляции. Соответствующая иллюстрация приведена на рис. 48.

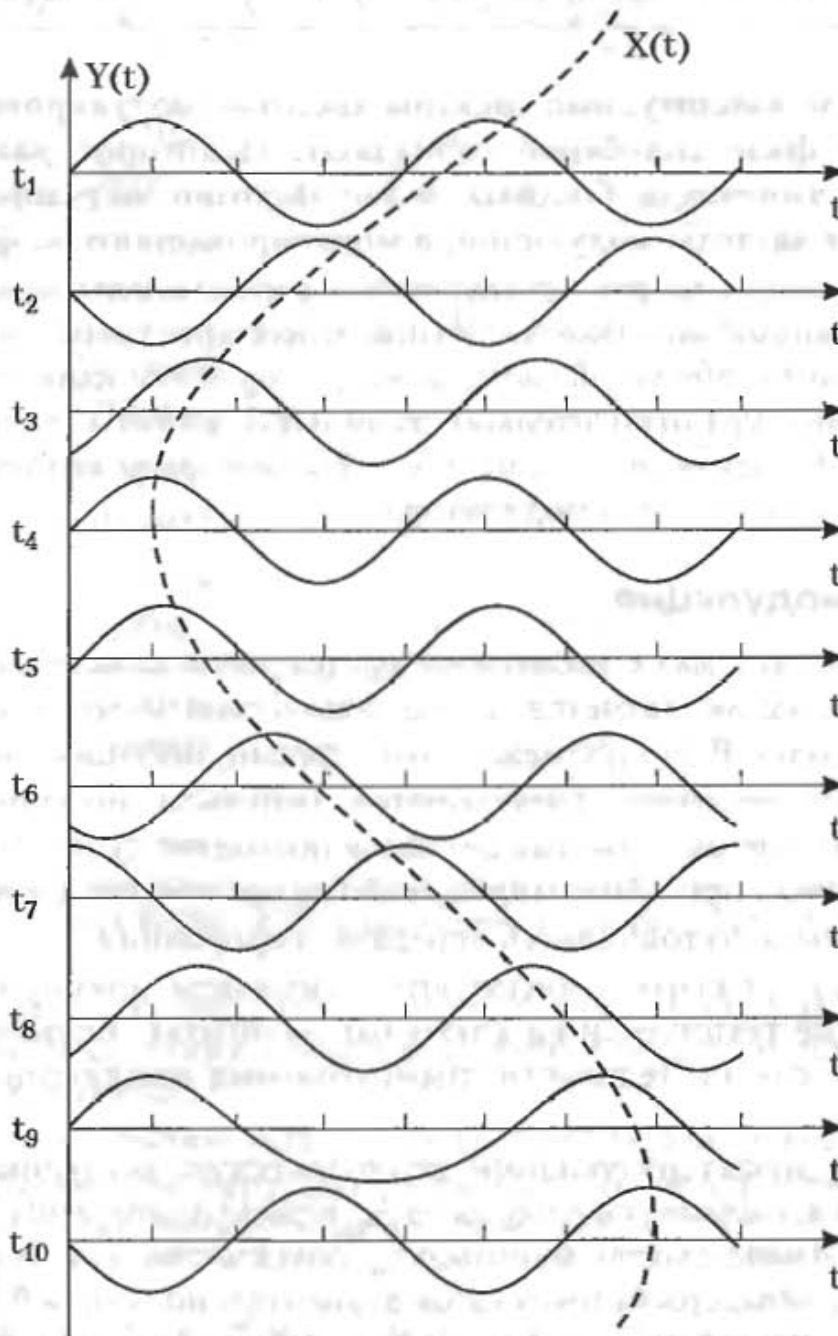


Рис. 48. Фазовая модуляция гармонического колебания

Для исследования спектра колебания, модулированного по фазе, приведем последнее выражение к виду:

$$Y(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\Delta\varphi \cos \Omega t) - A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\Delta\varphi \cos \Omega t).$$

В общем случае опять-таки нужно было бы воспользоваться разложением по функциям Бесселя:

$$\cos(x \cos z) = J_0(x) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(x) \cos 2nz;$$

$$\sin(x \cos z) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(x) \cos(2n+1)z,$$

но, ограничившись для простоты случаем неглубокой модуляции, получим:

$$Y(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - \Delta\varphi \frac{A_0}{2} \sin((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0) - \Delta\varphi \frac{A_0}{2} \sin((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0).$$

Таким образом, амплитудные спектры частотно-модулированного и модулированного по фазе колебаний совпадают. Некоторое различие состоит лишь в том, что амплитуды боковых полос частотно-модулированного колебания зависят от частоты модуляции, а модулированного по фазе — нет.

Фазовая модуляция может осуществляться изменением параметров линейной цепи с неравномерной фазочастотной характеристикой, на вход которой подаются колебания стабильной частоты, например путем изменения расстройки колебательного контура относительно стабильной частоты генератора. Другим способом фазовой модуляции при малых девиациях фазы является использование балансного амплитудного модулятора.

Импульсная модуляция

В измерительных системах с временным разделением каналов носителем измерительной информации является не гармоническое колебание, а последовательность импульсов. В паузах между импульсами, несущими информацию об одной измеряемой величине, размещаются импульсы, несущие информацию о другой. Применение импульсных сигналов позволяет существенно увеличить мощность в импульсе при сравнительно небольшой средней мощности и тем самым повысить помехоустойчивость передачи информации.

Чаще всего на практике используются импульсы прямоугольной формы, легко реализуемые технически на ключевых элементах. Временная диаграмма периодической последовательности прямоугольных импульсов изображена на рис. 49.

Параметрами, характеризующими периодическую последовательность импульсов, являются: *амплитуда импульсов* A_0 , *период повторения* T , *частота импульсов* $f = 1/T$, *длительность импульса* τ_n , *скважность* T/τ_n и *фаза импульсов* $\varphi = 2\pi\tau_s/T$, где τ_s — задержка импульсов относительно опорной последовательности импульсов, показанной на рис. 49 пунктиром. Любой из этих параметров может изменяться сигналом $X(t)$, содержащим измерительную информацию. В связи с этим различают следующие виды импульсной модуляции: *амплитудно-импульсную* (АИМ), *частотно-импульсную* (ЧИМ), *широтно-импульсную* (ШИМ) и *фазово-импульсную* (ФИМ). Сущность этих видов модуляции иллюстрируется рис. 49.

При амплитудно-импульсной модуляции в соответствии с сигналом $X(t)$ меняется амплитуда импульсов. При частотно-импульсной модуляции изменяется частота повторения импульсов. При этом остается постоянной либо длительность импульсов (ЧИМ 1), либо скважность (ЧИМ 2).

Различают также две разновидности широтно-импульсной модуляции. При ШИМ 1 в зависимости от модулирующего сигнала изменяется положение только заднего фронта импульса (односторонняя ШИМ). При ШИМ 2 симметрично

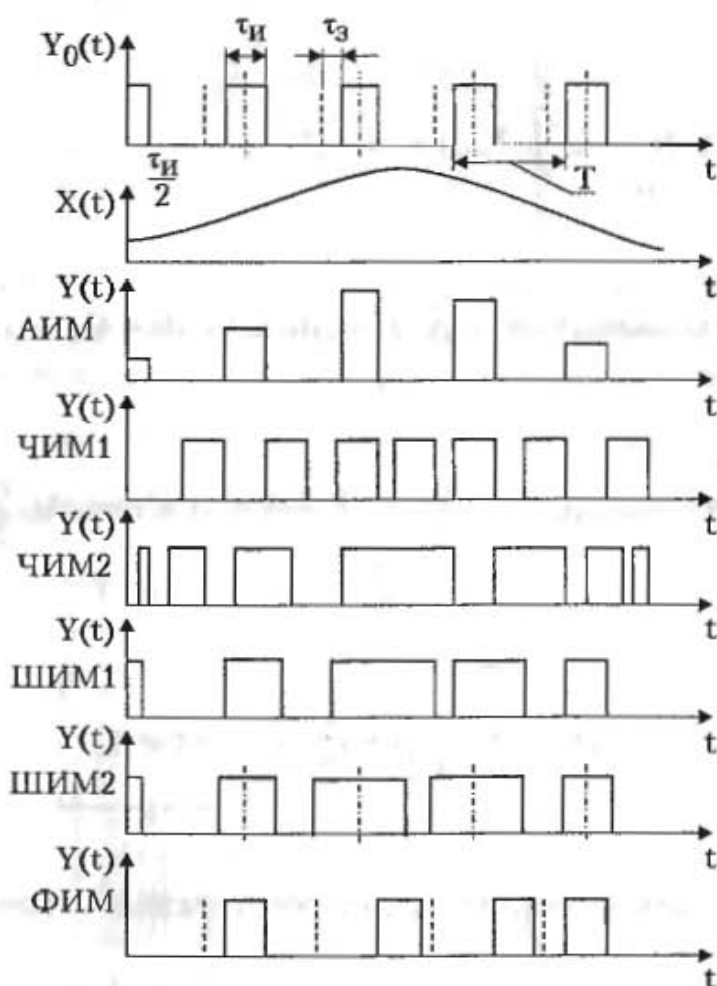


Рис. 49. Периодическая последовательность прямоугольных импульсов $Y_0(t)$, модулирующий сигнал $X(t)$ и различные виды импульсной модуляции

меняется положение и переднего и заднего фронта импульса (двусторонняя ШИМ), причем неизменный период повторения определяется положением середины каждого импульса.

При фазово-импульсной модуляции (ФИМ) модулирующий сигнал не меняет форму и параметры импульсов, а смещает их по оси времени.

Спектр одиночного прямоугольного импульса

$$\dot{Y}_1(\omega) = \int_{-\frac{\tau_{И}}{2}}^{\frac{\tau_{И}}{2}} A_0 e^{-j\omega t} dt = \frac{A_0}{j\omega} \left(e^{j\omega \frac{\tau_{И}}{2}} - e^{-j\omega \frac{\tau_{И}}{2}} \right) = A_0 \tau_{И} \frac{\sin \omega \frac{\tau_{И}}{2}}{\omega \frac{\tau_{И}}{2}}.$$

Графическое его изображение представлено на рис. 32 и 36, а. Спектр является бесконечным и имеет нули при частотах $\omega = \frac{2\pi}{\tau_{И}} n$. Под реальной шириной спектра понимают полосу частот, ограниченную первым лепестком. Эта полоса частот тем больше, чем меньше длительность импульса.

Спектральный состав последовательности прямоугольных импульсов можно получить, разложив функцию $Y_0(t)$, показанную на рис. 49, в ряд Фурье:

$$Y_0(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n\omega_1 t,$$

где $\omega_1 = 2\pi/T$ — круговая частота первой гармоники.

Здесь

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} Y_0(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{\tau_H}{2}}^{\frac{\tau_H}{2}} A_0 dt = A_0 \frac{\tau_H}{T};$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} Y_0(t) \sin n\omega_1 t \cdot dt = \frac{2}{T} \int_{-\frac{\tau_H}{2}}^{\frac{\tau_H}{2}} A_0 \sin n\omega_1 t \cdot dt = 0;$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} Y_0(t) \cos n\omega_1 t \cdot dt = \frac{2}{T} \int_{-\frac{\tau_H}{2}}^{\frac{\tau_H}{2}} A_0 \cos n\omega_1 t \cdot dt = 2A_0 \frac{\tau_H}{T} \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_H}{2}}{n\omega_1 \frac{\tau_H}{2}},$$

поэтому

$$Y_0(t) = A_0 \frac{\tau_H}{T} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t \right),$$

где $a_n = \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_H}{2}}{n\omega_1 \frac{\tau_H}{2}}$. Спектр амплитуд, соответствующий этому выражению, приведен на рис. 46 в части I. Он линейчатый (дискретный) с расстояниями между линиями $1/T$. Рассмотрев дискретные значения частоты $\omega = n\omega_1$, можно заметить, что амплитуды соответствующих спектральных составляющих определяются выражением

$\frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_H}{2}}{n\omega_1 \frac{\tau_H}{2}}$, которое описывает спектр амплитуд одиночного

прямоугольного импульса. Поэтому график спектра амплитуд одиночного импульса является огибающей спектра амплитуд периодической последовательности импульсов, а реальная ширина спектра периодической последовательности определяется длительностью импульсов. Она тем больше, чем меньше длительность импульса.

Влияние модуляции на спектральный состав последовательности прямоугольных импульсов рассмотрим на примере АИМ. Пусть, по-прежнему, $X(t) = B \cos \Omega t$. Амплитуда импульсов в этом случае меняется по закону:

$$A(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t),$$

где $m = \frac{B}{A_0} \leq 1$ — глубина модуляции. Амплитудно-модулированная последовательность прямоугольных импульсов

$$Y(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \frac{\tau_H}{T} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t \right).$$

После тригонометрических преобразований получим:

$$Y(t) = A_0 \frac{\tau_{и}}{T} + A_0 \frac{\tau_{и}}{T} m \cos \Omega t + 2A_0 \frac{\tau_{и}}{T} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t + \\ + A_0 \frac{\tau_{и}}{T} m \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_1 - \Omega) t + A_0 \frac{\tau_{и}}{T} m \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_1 + \Omega) t.$$

Соответствующий спектр амплитуд при скважности, равной 4, изображен на рис. 50. Кроме основных линий, содержащихся в спектре немодулированной последовательности прямоугольных импульсов, имеются боковые линии, расположенные по обе стороны от основных на расстоянии $\frac{\Omega}{2\pi}$. Амплитуды этих боковых линий в $\frac{m}{2}$ раз меньше амплитуд основных линий спектра.

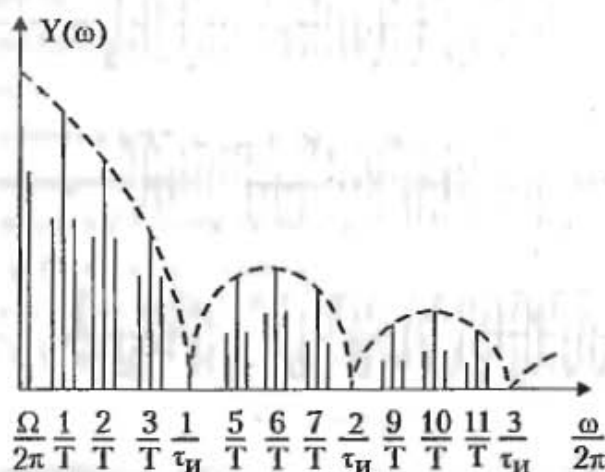


Рис. 50. Спектр амплитуд последовательности прямоугольных импульсов при амплитудно-импульсной модуляции

При ЧИМ, ШИМ и ФИМ даже при простейшей гармонической модуляции (как в рассмотренном примере) вокруг каждой основной линии спектра располагается бесконечное множество боковых линий, однако их амплитуды быстро убывают. Таким образом, любая импульсная модуляция обогащает спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов, но ширина его при этом остается такой же, как у одиночного импульса.

Кодово-импульсная модуляция

При передаче закодированной измерительной информации по дискретным каналам связи применяется кодово-импульсная модуляция. Иногда ее называют *манипуляцией*, а соответствующие устройства (модуляторы или манипуляторы) — *модемами*.

Как и в предыдущем случае, кодово-импульсная модуляция может быть *амплитудной* (АМ), *частотной* (ЧИМ) и *фазовой* (ФМ).

На рис. 51 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие различные виды манипуляции. При АМ кодовому элементу 1 соответствует передача несущего колебания в течение времени T (посылка), кодовому элементу 0 — отсутствие колебания (пауза). При ЧМ передача несущего колебания с частотой ω_1 соответствует кодовому элементу 1, а передача колебания с частотой ω_0 — элементу 0.

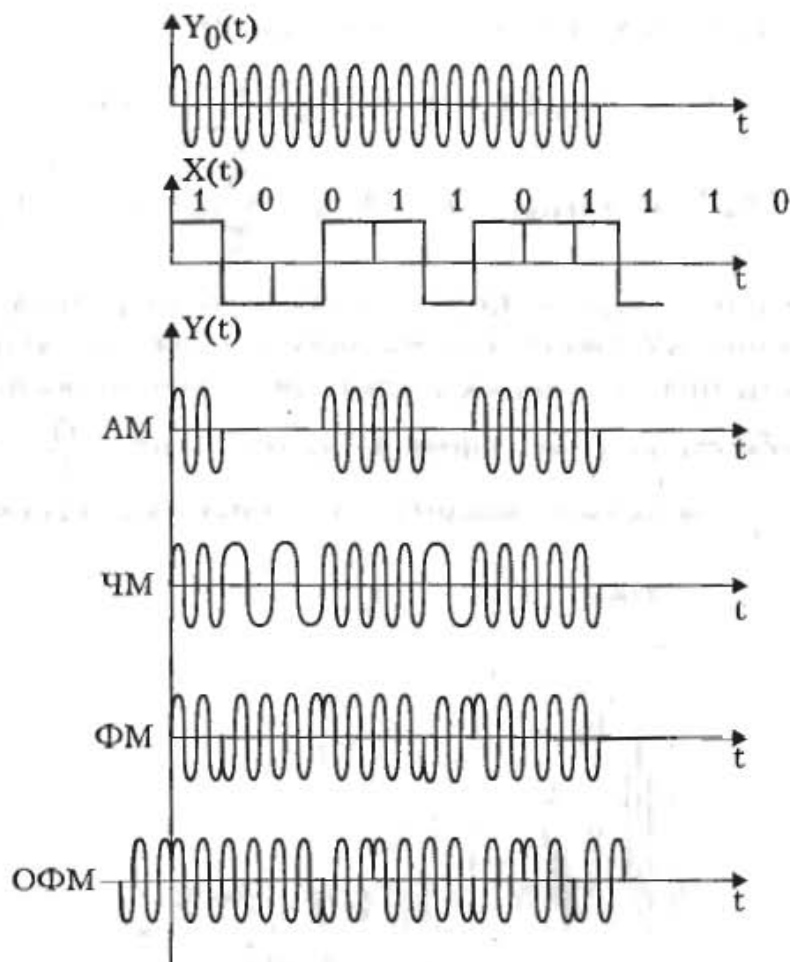


Рис. 51. Временные диаграммы при различных видах кодово-импульсной модуляции

При двоичной ФМ меняется фаза несущей на π при каждом переходе от 1 к 0 и от 0 к 1.

Наконец, на практике нашла применение *относительная фазовая модуляция* (ОФМ). В отличие от ФМ при ОФМ фаза несущего колебания отсчитывается не от начальной фазы, а от фазы предыдущего элемента сигнала. В двоичном случае символ 0 передается отрезком синусоиды с начальной фазой предшествующего элемента сигнала, а символ 1 — таким же отрезком с начальной фазой, отличающейся на π от фазы предыдущего элемента сигнала. Начинается передача при ОФМ с посылки одного, не несущего информации элемента, фаза которого является опорной для сравнения с ней фазы последующего элемента.

В более общем случае кодово-импульсную модуляцию следует рассматривать как преобразование кодовых элементов в определенные отрезки несущей частоты, причем не обязательно гармонического колебания. Это может быть и периодическая последовательность импульсов прямоугольной или любой другой формы. На практике $Y_0(t)$ выбирают таким образом, чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым к системе связи (в частности по скорости передачи информации и по занимаемой полосе частот) и чтобы сигналы хорошо различались на фоне помех.

Длительность посылки при кодово-импульсной модуляции определяет *скорость передачи измерительной информации*. Эта скорость выражается числом посылок в единицу времени и измеряется в *бодах*. Один бод равен скорости передачи, при которой за 1 с передается одна посылка.

Если длительность посылки выражена в секундах, то скорость телеграфирования $c = \frac{1}{T}$ бод. Частота манипуляции не превышает $F_m = \frac{1}{2} T = \frac{c}{2}$ Гц. Если полосу частот $X(t)$ ограничить третьей гармоникой, то с шириной спектра модулирующего сигнала F_c скорость передачи будет связана соотношением:

$$c = \frac{F_c}{1,5} \approx 0,7F_c.$$

2.7.4. Согласование сигнала с каналом

Обычно первичный измерительный преобразователь преобразует измеряемую величину в электрический сигнал $X(t)$, который нужно передать по каналу связи. В зависимости от того, что представляет собой канал связи (электрический провод или кабель, световод, водная среда, воздушное или безвоздушное пространство), носителями измерительной информации могут быть электрический ток, луч света, звуковые колебания, радиоволны и т. п. Выбор носителя является первым этапом согласования сигнала с каналом.

Обобщенными характеристиками канала связи являются время T_k , в течение которого он предоставлен для передачи измерительной информации, ширина полосы пропускания F_k и динамический диапазон H_k , под которым понимают отношение допустимой мощности, на которую рассчитан канал, к мощности неизбежно присутствующих в нем помех, выраженное в децибелах. Произведение

$$V_k = T_k F_k H_k$$

называется емкостью канала.

Аналогичными обобщенными характеристиками сигнала являются время T_c , в течение которого происходит передача измерительной информации, ширина спектра F_c и динамический диапазон H_c — выраженное в децибелах отношение наибольшей мощности сигнала к той наименьшей мощности, которую необходимо отличать от нуля при заданном качестве передачи. Произведение

$$V_c = T_c F_c H_c$$

называется объемом сигнала.

Геометрическая интерпретация введенных представлений показана на рис. 52.

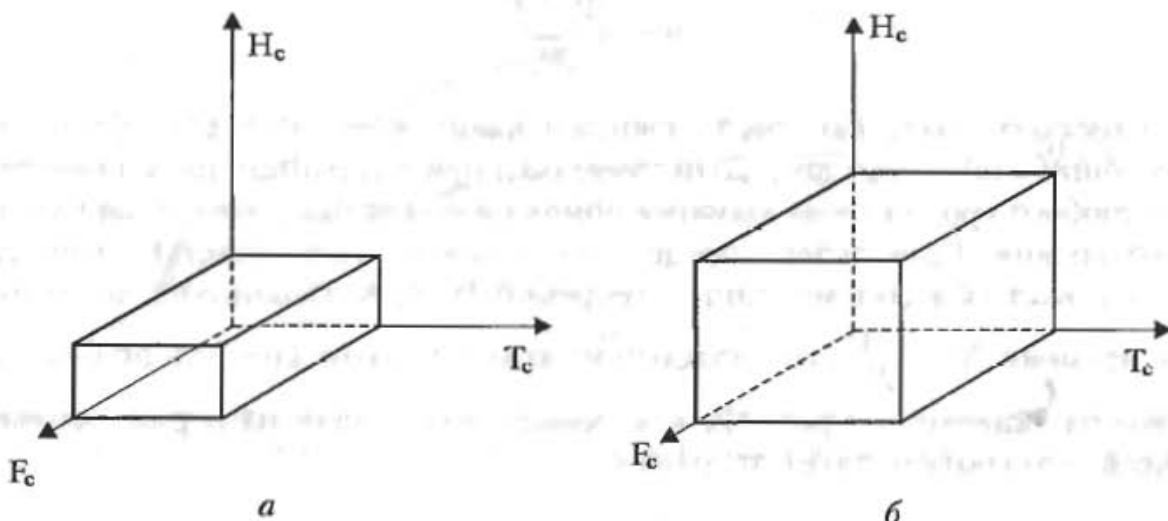


Рис. 52. Объем сигнала (а) и емкость канала (б)

Условием согласования сигнала с каналом, обеспечивающим передачу измерительной информации без потерь и искажений при наличии помех, служит выполнение неравенства

$$V_c \leq V_k.$$

В простейшем случае оно выполняется при

$$\begin{aligned} T_c &\leq T_k; \\ F_c &\leq F_k; \\ H_c &\leq H_k, \end{aligned}$$

когда объем сигнала полностью «вписывается» в емкость канала. Однако условие согласования сигнала с каналом может выполняться и тогда, когда некоторые (но не все) из последних неравенств не выполняются. В этом случае возникает необходимость так называемых *обменных операций*, при которых происходит как бы «обмен» длительности сигнала на ширину его спектра, или ширины спектра на динамический диапазон сигнала и т. п.

Пример 23

Сигнал, имеющий ширину спектра 3 кГц, необходимо передать по каналу, полоса пропускания которого 300 Гц. Это можно сделать, записав его предварительно на магнитную ленту и воспроизводя при передаче со скоростью, в 10 раз меньшей скорости записи. При этом все частоты исходного сигнала уменьшатся в 10 раз, и во столько же раз увеличится время передачи. Принятый сигнал при этом также нужно будет записать на магнитную ленту. Воспроизводя его затем со скоростью, в 10 раз большей, можно будет восстановить исходный сигнал.

Аналогичным образом можно за короткое время передать длительный сигнал, если полоса пропускания канала шире спектра сигнала.

В каналах с аддитивными некоррелированными помехами

$$H_k = \log \frac{P_c + P_n}{P_n},$$

где P_c и P_n — соответственно мощности сигнала и помех. При передаче электрических сигналов отношение

$$n = \frac{\sqrt{P_c + P_n}}{\sqrt{P_n}}$$

можно рассматривать как число уровней квантования сигнала, обеспечивающих безошибочную передачу. Действительно при выбранном шаге квантования сигнал любого уровня из-за влияния помех не может быть принят за сигнал соседнего уровня. Если теперь представить сигнал совокупностью мгновенных значений, взятых в соответствии с теоремой В. А. Котельникова через промежутки времени $\Delta t = \frac{1}{2F_c}$, то в каждый из этих моментов времени он будет соответствовать одному из уровней, т. е. может иметь одно из n равновероятных значений, что соответствует энтропии

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} = -\log \frac{1}{n} = \log n.$$

После регистрации приемным устройством одного из уровней в фиксированный момент времени энтропия (апостериорная) окажется равной 0, а квант информации (количество информации, переданной в дискретный момент времени)

$$I_{\text{кв}}(X) = \log n = \frac{1}{2} \log \frac{P_c + P_n}{P_n}.$$

Так как весь сигнал передается $N = 2 F_c T_c$ квантами, то количество содержащейся в нем информации

$$I(X) = F_c T_c \log \left(1 + \frac{P_c}{P_n} \right) = V_c \frac{\log \left(1 + \frac{P_c}{P_n} \right)}{H_c}$$

прямо пропорционально объему сигнала. Для передачи этой информации за время T_k необходимо обеспечить скорость передачи

$$c = \frac{I(X)}{T_k}.$$

Если сигнал с каналом согласованы и $T_c = T_k$; $F_c = F_k$, то

$$c = F_k \log \left(1 + \frac{P_c}{P_n} \right).$$

Это формула К. Шеннона для предельной пропускной способности канала. Она устанавливает максимальную скорость безошибочной передачи информации. При $T_c < T_k$ или $F_c < F_k$ скорость может быть меньшей, а при $T_c > T_k$ или $F_c > F_k$ возможны ошибки.

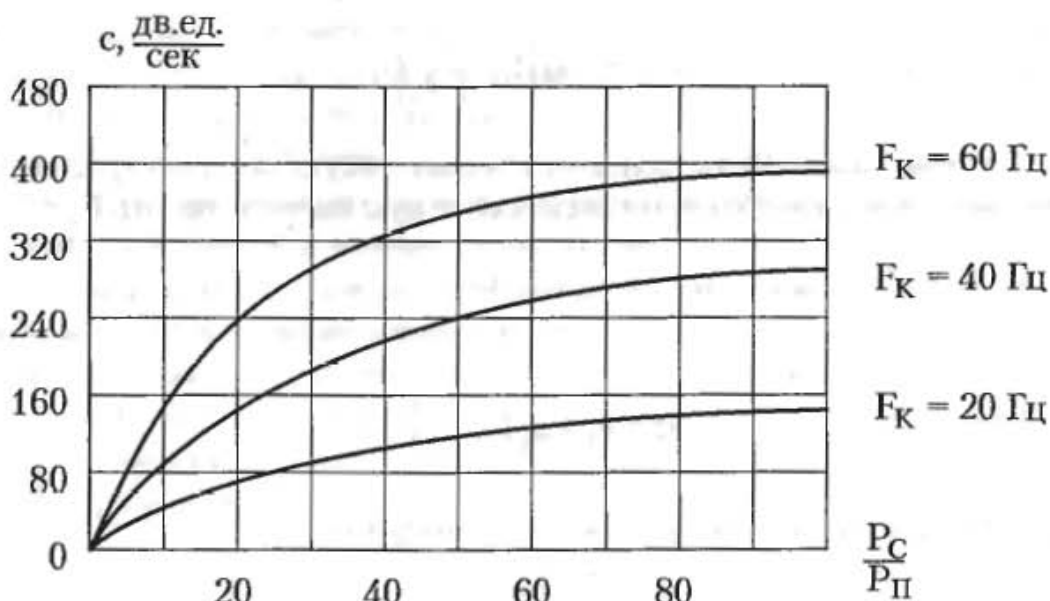


Рис. 53. Зависимость предельной пропускной способности канала от отношения сигнал/помеха при различных значениях ширины полосы пропускания канала

Зависимость предельной пропускной способности канала от отношения сигнал/помеха при нескольких значениях ширины полосы пропускания канала

показана на рис. 53. Характер этой зависимости разный при больших и малых отношениях $\frac{P_c}{P_n}$. Если $\frac{P_c}{P_n} \gg 1$, то с хорошим приближением

$$c = F_k \log \frac{P_c}{P_n},$$

т. е. зависимость пропускной способности канала от отношения сигнал/помеха логарифмическая. Если $\frac{P_c}{P_n} \ll 1$, то, несмотря на то что $P_n \gg P_c$, безошибочная передача все-таки возможна, но с очень малой скоростью. В этом случае справедливо разложение

$$\log \left(1 + \frac{P_c}{P_n} \right) = \ln \left(1 + \frac{P_c}{P_n} \right) \log e = \left(\frac{P_c}{P_n} - \frac{1}{2} \frac{P_c^2}{P_n^2} + \frac{1}{3} \frac{P_c^3}{P_n^3} - \dots \right) \log e,$$

в котором можно ограничиться первым членом. С учетом того, что $\log e = 1,443$, получим:

$$c = 1,443 F_k \frac{P_c}{P_n}.$$

Таким образом, при малых отношениях сигнал/помеха зависимость пропускной способности от отношения сигнал/помеха линейна.

Зависимость пропускной способности от ширины полосы пропускания канала в реальных системах более сложная, чем просто линейная. От полосы пропускания канала зависит мощность шумовой помехи на входе приемного устройства. Если спектр помехи равномерный, то $P_n = F_k \cdot G$, где G — спектральная плотность мощности помехи, т. е. мощность помехи, приходящаяся на единицу полосы частот. Тогда

$$c = F_k \log \left(1 + \frac{P_c}{F_k G} \right).$$

Мощность сигнала можно выразить через такую же спектральную плотность, если ввести в рассмотрение эквивалентную полосу частот $F_э$:

$$P_c = F_э \cdot G.$$

Тогда

$$c = F_k \log \left(1 + \frac{F_э}{F_k} \right).$$

Разделив обе части этого выражения на $F_э$, получим

$$\frac{c}{F_э} = \frac{F_k}{F_э} \log \left(1 + \frac{F_э}{F_k} \right).$$

Характер этой зависимости показан на рис. 54. Важно отметить, что с увеличением полосы пропускания канала его пропускная способность не увеличива-

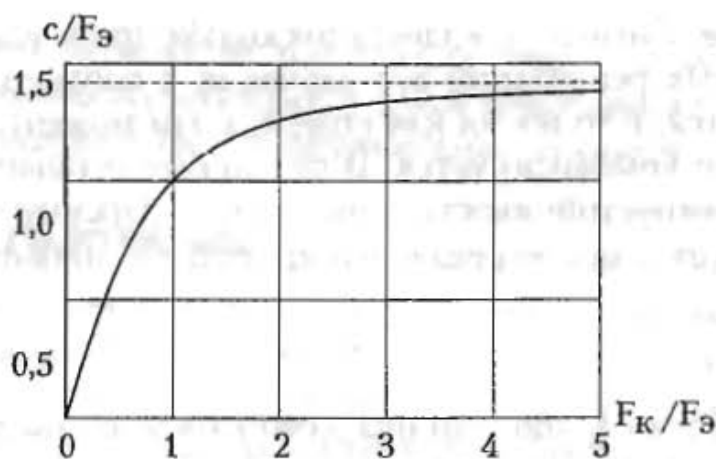


Рис. 54. Зависимость предельной пропускной способности канала от ширины полосы пропускания при равномерной спектральной плотности помехи

ется безгранично, а стремится к некоторому пределу. Это объясняется усилением шума в канале и ухудшением отношения сигнал/шум на входе приемного устройства.

Предел, к которому с ростом F_k стремится предельная пропускная способность канала, можно определить, воспользовавшись при больших F_k уже известным разложением логарифмической функции в ряд. Тогда, если

$$\log\left(1 + \frac{F_{\text{э}}}{F_k}\right) = \frac{F_{\text{э}}}{F_k} \log e,$$

то $\frac{c}{F_{\text{э}}} = \log e = 1,443$, откуда $c = 1,443 \frac{P_c}{G}$.

Таким образом, максимальное значение, к которому стремится предельная пропускная способность канала с ростом его ширины полосы пропускания, пропорционально отношению мощности сигнала к мощности помех, приходящейся на единицу полосы частот. Отсюда, очевидно, вытекает следующий практический вывод: для увеличения предельной пропускной способности канала нужно увеличивать мощность передающего устройства и использовать приемное устройство с минимальным уровнем шумов на входе.

Скорость передачи измерительной информации определяет эффективность системы связи, входящей в измерительную систему.

Наряду с эффективностью вторым важнейшим показателем качества системы связи является помехоустойчивость. При передаче измерительной информации в аналоговой форме она оценивается по отклонению принятого сигнала от переданного. Помехоустойчивость дискретных каналов связи характеризуется вероятностью ошибки $P_{\text{ош}}$ (отношением числа ошибочно принятых знаков к общему числу переданных) и связана с ней зависимостью:

$$\alpha = \lg \frac{1}{P_{\text{ош}}}.$$

Если, например, $P_{\text{ош}} = 10^{-5}$, то $\alpha = 5$; если $P_{\text{ош}} = 10^{-6}$, то $\alpha = 6$.

Эффективным способом повышения помехоустойчивости при передаче измерительной информации в аналоговой форме и некоррелированных помехах

является *накопление*. Сигнал передается несколько раз и при когерентном сложении всех принятых реализаций его значения в соответствующие моменты времени суммируются, в то время как помеха в эти моменты времени, являясь случайной, частично компенсируется. В результате отношение сигнал/помеха увеличивается, помехоустойчивость повышается. Аналогичным образом идея накопления реализуется при передаче измерительной информации по дискретному каналу.

Пример 24

Пусть характер помехи таков, что она может быть принята за сигнал (т. е. 0 может быть принят за 1). При передаче кодом Бодо комбинация 01001 трижды принята в виде:

11001;
11011,
01111.

Если сумматором является устройство, не срабатывающее при появлении хотя бы одного нуля в столбце, то комбинация будет принята правильно при условии, что каждый ноль хотя бы раз был принят верно.

Если при одной передаче вероятность независимых ошибок обозначить через $P_{\text{ош}}$, то после N -кратного повторения передачи она будет равна $P_{\text{ош}}^N$. Следовательно, помехоустойчивость после N повторных передач

$$\alpha_N = \lg \frac{1}{P_{\text{ош}}^N} = N \lg \frac{1}{P_{\text{ош}}} = N \alpha$$

где α — помехоустойчивость при однократной передаче. Таким образом, помехоустойчивость при накоплении возрастает в число повторений раз.

Одним из способов повышения помехоустойчивости является также *применение корректирующих кодов*.

Повышение помехоустойчивости достигается за счет увеличения избыточности, а в более общем плане — за счет увеличения объема сигнала при том же количестве измерительной информации. При этом должно сохраняться условие согласования сигнала с каналом. При выполнении этого условия и $T_c = T_k$; $H_c = H_k$ передача измерительной информации с помощью амплитудно-модулированного высокочастотного колебания является более помехоустойчивой, чем непосредственная передача сигнала, потому что в случае, например, тональной модуляции занимает вдвое большую полосу частот. В свою очередь, применение глубокой частотной или фазовой модуляции благодаря расширению спектра, еще больше повышает помехоустойчивость системы связи. В этом смысле перспективным является применение не *простых* сигналов, у которых $F_c T_c \approx 1$, а *сложных*, для которых $F_c T_c \gg 1$. К ним относятся импульсные сигналы с высокочастотным заполнением и частотной модуляцией или фазовой манипуляцией несущих колебаний и др.

Требования эффективности и помехоустойчивости систем связи являются противоречивыми. Они побуждают, с одной стороны, уменьшать, а с другой —

увеличивать объем сигнала, не нарушая условия согласования его с каналом и не меняя количества содержащейся в нем информации. Удовлетворение этих требований предполагает синтез оптимальных технических решений.

2.7.5. Детектирование

В приемном устройстве (см. рис. 38) модулированные высокочастотные колебания или последовательность импульсов должны быть обратно преобразованы в сигнал $X(t)$. Если измерительная информация была представлена в аналоговой форме (непрерывный модулирующий сигнал), то такое преобразование достигается с помощью *детектирования (демодуляции)*. Если же измерительная информация была закодирована, то в результате детектирования восстанавливаются кодовые комбинации, после чего измерительная информация должна быть декодирована, а в случае необходимости представления ее в аналоговой форме должен быть *восстановлен непрерывный сигнал*.

В зависимости от вида модуляции детектирование может быть *амплитудным, частотным, фазовым, импульсным* и т. д.

Детектирование амплитудно-модулированных колебаний осуществляется посредством преобразований вида

$$X_d(t) = |Y(t)|$$

или

$$X_d(t) = Y^2(t).$$

Детекторы, имеющие такие функции преобразования, называются, соответственно, *линейным* и *квадратичным*. Название «линейный детектор» является условным, так как модуль не является линейной функцией переменного аргумента. При подлинно линейных функциях преобразования никакое детектирование невозможно.

Работа линейного детектора иллюстрируется рис. 55. При подаче на его вход амплитудно-модулированного колебания

$$Y(t) = A_0(1 + m \sin \Omega t) \sin \omega_0 t$$

сигнал на выходе детектора будет

$$X_d(t) = A_0(1 + m \sin \Omega t) |\sin \omega_0 t|,$$

так как глубина модуляции $m \leq 1$ и множитель в круглых скобках всегда положителен. Для изучения спектрального состава этого сигнала разложим четную периодическую функцию $|\sin \omega_0 t|$ с периодом $T = \frac{\pi}{\omega_0}$ в ряд Фурье:

$$|\sin \omega_0 t| = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n \omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} \cos n \omega_1 t,$$

где $\omega_1 = 2\omega_0$. В этом разложении

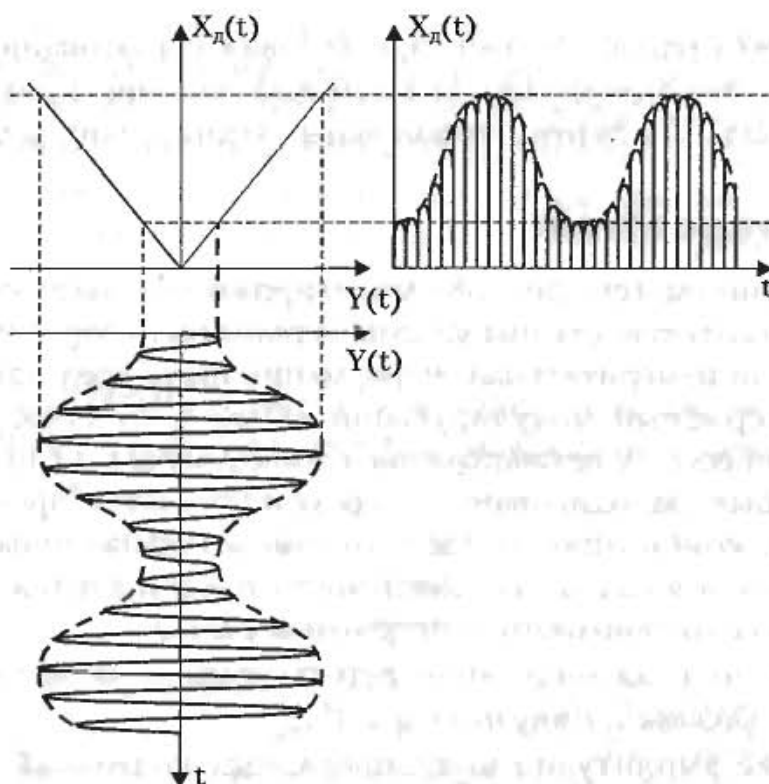


Рис. 55. Линейное детектирование амплитудно-модулированных колебаний

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |\sin \omega_0 t| dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega_0 t \cdot dt = \frac{2}{\pi};$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |\sin \omega_0 t| \sin n\omega_1 t \cdot dt = 0;$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |\sin \omega_0 t| \cos n\omega_1 t \cdot dt = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega_0 t \cos \omega_1 t \cdot dt = -\frac{4}{\pi(4n^2 - 1)},$$

поэтому

$$|\sin \omega_0 t| = \frac{2}{\pi} \left(1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2n\omega_0 t}{4n^2 - 1} \right).$$

С учетом такого представления $|\sin \omega_0 t|$,

$$X_d(t) = A_0 \frac{2}{\pi} (1 + m \sin \Omega t) \left(1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2n\omega_0 t}{4n^2 - 1} \right).$$

Раскрыв скобки и произведя тригонометрические преобразования, получим

$$X_d(t) = \frac{2}{\pi} \left\{ A_0 + B \sin \Omega t - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{4n^2 - 1} \left[A_0 \cos n\omega_0 t - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{B}{2} \sin(2n\omega_0 - \Omega)t + \frac{B}{2} \sin(2n\omega_0 + \Omega)t \right] \right\},$$

где $B = mA_0$.

В этом выражении второе слагаемое в фигурных скобках есть не что иное, как модулирующий сигнал, который нетрудно выделить низкочастотным фильтром. Тем самым задача восстановления сигнала

$$X(t) = B \sin \Omega t,$$

несущего измерительную информацию, будет решена.

При квадратичном детектировании

$$\begin{aligned} X_n(t) &= A_0^2 (1 + m \sin \Omega t)^2 \sin^2 \omega_0 t = \\ &= \frac{1}{2} \left[A_0^2 + \frac{B^2}{2} + 2B \sin \Omega t - \frac{B^2}{2} \cos 2\Omega t - \left(A_0 + \frac{B^2}{2} \right) \cos 2\omega_0 t - \right. \\ &\quad \left. - B \sin(2\omega_0 - \Omega)t + B \sin(2\omega_0 + \Omega)t + B^2 \cos 2(\omega_0 - \Omega)t + B^2 \cos 2(\omega_0 + \Omega)t \right]. \end{aligned}$$

Спектр сигнала на выходе квадратичного детектора оказывается более богатым, причем особенно неприятным является обогащение низкочастотной части спектра, что затрудняет фильтрацию полезного сигнала $X(t) = B \sin \Omega t$. Поэтому линейное детектирование является более предпочтительным.

Все способы частотной и фазовой демодуляции основаны на предварительном преобразовании этих видов модуляции в амплитудную и последующем детектировании с помощью амплитудного детектора. Для преобразования используются линейные цепи с неравномерной амплитудно-частотной характеристикой, которая в диапазоне частот модулированного сигнала должна быть линейной. В качестве конкретных схем этого типа используются расстроенные контуры, пары расстроенных контуров, частотные дискриминаторы и т. п.

В информационно-измерительной технике частотно-модулированный сигнал чаще всего преобразуется непосредственно в цифровые отсчеты с помощью цифрового частотомера.

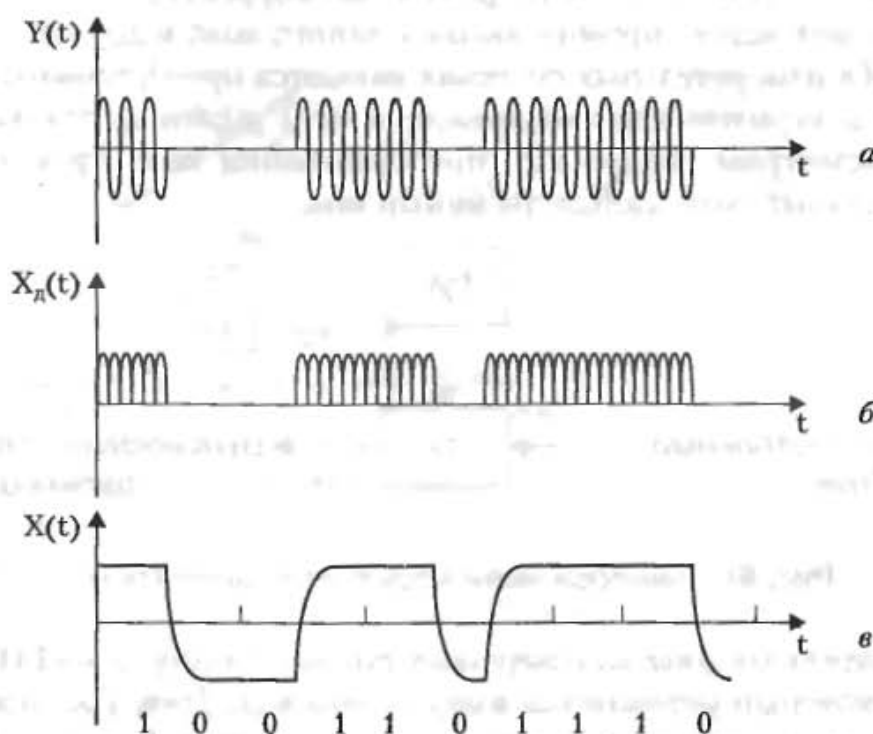


Рис. 56. Преобразование сигналов в приемном устройстве при амплитудной кодово-импульсной модуляции: а — сигнал на входе импульсного детектора; б — сигнал на выходе детектора; в — сигнал на выходе низкочастотного фильтра

При амплитудно-импульсной модуляции детектирование осуществляется с помощью пикового детектора, после которого сигнал пропускается через низкочастотный фильтр. Работа пикового детектора рассмотрена в разделе 2.3. Здесь, как и в предыдущем случае, можно отметить возможность непосредственного преобразования амплитудных значений импульсов в цифровые отсчеты с помощью цифрового вольтметра и последующего восстановления сигнала при необходимости представления измерительной информации в аналоговой форме.

При кодово-импульсной модуляции амплитудное, частотное или фазовое детектирование предшествует декодированию. Последовательность преобразований при амплитудной кодово-импульсной модуляции поясняет рис. 56. Можно сказать, что здесь достигается промежуточный результат — восстановление кодовых комбинаций. Далее они поступают в *декодер* — устройство, в котором осуществляется обнаружение и исправление ошибок в кодовых комбинациях, а затем производится декодирование измерительной информации.

2.7.6. Декодирование и восстановление сигнала

В системах связи общего назначения, где с помощью кодовых комбинаций передаются некоторые символы (например, буквы или звуки), декодирование выполняется с помощью кодовых таблиц или определенных правил. В измерительных системах информация, переданная по каналу связи, должна быть приведена к виду, удобному для ее дальнейшей переработки либо восприятия человеком в цифровой или аналоговой форме.

Для переработки в современных ЦЭВМ желательно, чтобы измерительная информация была представлена в двоичном коде, соответствующем двоичной системе счисления. Человек легко воспринимает цифровую информацию в десятичной системе счисления (десятичном коде). Для передачи же измерительной информации по каналам связи используются другие коды, обладающие повышенной помехоустойчивостью (отраженные, корректирующие и т. п.). Таким образом, возникает задача преобразования одного кода в другой.

Декодерами в измерительных системах являются преобразователи код — код.

Приведение измерительной информации к виду, удобному для дальнейшей переработки, рассмотрим на примере преобразования кода Грея, непригодного для вычислительных операций, в двоичный код.

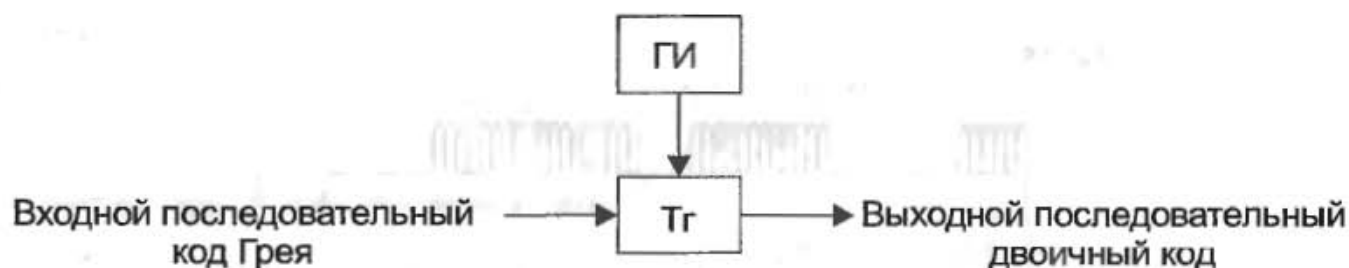


Рис. 57. Преобразование кода Грея в двоичный код

Преобразователь состоит из генератора тактовых импульсов ГИ (см. рис. 57) и триггера Тг, который управляется импульсами кода Грея. Для преобразования используется совпадение знаков старшего разряда у кода Грея и у обычного двоичного кода. Последовательность работы преобразователя поясняется на примере преобразования числа 8 в коде Грея (1100) в число 8 в двоичном коде (1000):

Тактовые импульсы		1		1		1		1	
Импульсы кода Грея, управляющие нормально закрытым триггером		1	↓	1	↓	0	↓	0	↓
Состояние триггера	Закрыт		Открыт		Закрыт		Закрыт		Закрыт
Импульсы двоичного кода на выходе схемы			1		0		0		0

Первый импульс кода Грея старшего разряда открывает закрытый триггер, и первый тактовый импульс проходит на выход, образуя импульс старшего разряда двоичного кода. Второй импульс кода Грея закрывает триггер, который остается в дальнейшем закрытым, так как в остальных двух младших разрядах числа 8 по коду Грея импульсов нет. Поэтому все остальные тактовые импульсы через закрытый триггер не проходят, и на выходе получается двоичный последовательный код числа 8.

Приведение измерительной информации к виду, удобному для восприятия человеком в цифровой форме, рассмотрим на примере преобразования семиразрядного кода Хэмминга (см. пример 21) в десятичный код.

Схема, поясняющая принцип действия преобразователя, приведена на рис. 58. Работа устройства основана на преобразовании импульсов, поступающих по каналам, соответствующим информационным разрядам кода Хэмминга, в пачки импульсов. Число импульсов в пачке равно числу двоичных единиц в разряде. Пачки импульсов поступают в счетчик импульсов СИ, в котором импульсы подсчитываются и результат выдается в десятичной системе счисления.

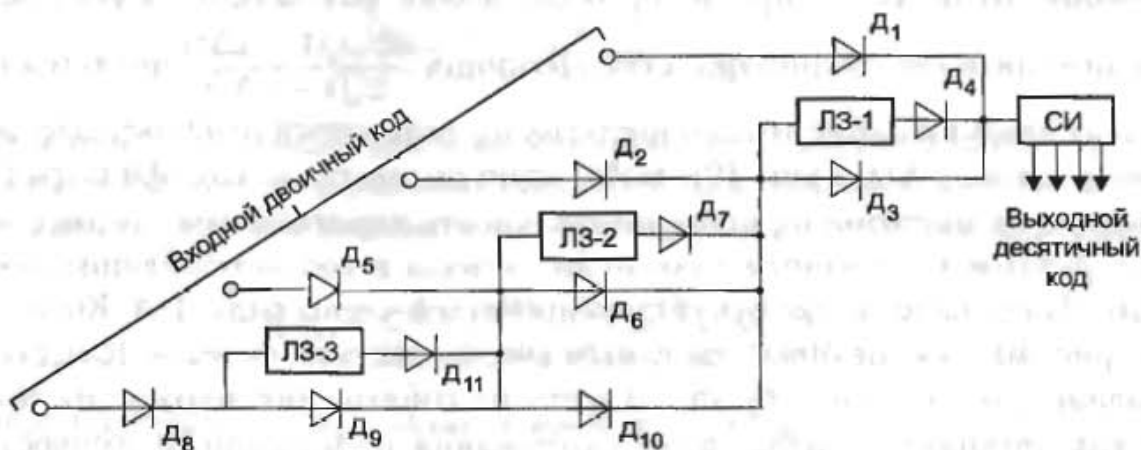


Рис. 58. Преобразование семиразрядного кода Хэмминга в десятичный код

Рассмотрим преобразование кодовой комбинации 0110011 в семиразрядном коде Хэмминга, построенном в примере 21, в десятичный код.

Импульс, соответствующий 1 в младшем информационном разряде, через диод D_1 поступает в счетчик импульсов СИ. Импульс, соответствующий 1 в следующем разряде, превращается в пачку из двух импульсов. Первый из них через диоды D_2 и D_3 проходит в счетчик непосредственно, а второй, образуемый на выходе линии задержки ЛЗ-1, следует за ним через диод D_4 с запаздыванием по времени на Δt . В следующем информационном разряде стоит 0,

поэтому через диод D_5 импульс в схему не поступает. Затем следует проверочный разряд, не подключенный к преобразователю. В старшем информационном разряде стоит 1. Соответствующий импульс превращается в пачку из 8 импульсов следующим образом. Через диоды D_8 , D_9 , D_{10} и D_3 он проходит в счетчик непосредственно. За ним через диод D_4 следует импульс, задержанный на Δt . Сформировавшийся на выходе линии задержки ЛЗ-2 импульс запаздывает на $2\Delta t$. Он опять-таки превращается в два импульса, первый из которых через диоды D_7 и D_3 поступает в счетчик непосредственно, а второй, образующийся на выходе линии задержки ЛЗ-1, следует за ним через диод D_4 с запаздыванием по времени на Δt . По отношению к самому первому импульсу он запаздывает, следовательно, уже на $3\Delta t$. Импульс, сформировавшийся на выходе линии задержки ЛЗ-3, запаздывает по отношению к первому на $4\Delta t$. Он превращается в 4 импульса, первый из которых поступает в счетчик непосредственно через диоды D_{11} , D_6 и D_3 , второй — с выхода линии задержки ЛЗ-1 через диод D_4 , третий — с выхода линии задержки ЛЗ-2 через диоды D_7 и D_3 и четвертый, сформировавшийся из предыдущего после задержки на время Δt в линии задержки ЛЗ-1, — через диод D_4 . Таким образом, показание счетчика в десятичной системе счисления будет равно 11, что соответствует кодовой таблице, приведенной в примере 21.

Если измерительная информация должна быть представлена в аналоговой форме, то возникает задача восстановления непрерывного сигнала (см. рис. 39, а) по ряду его дискретных значений (см. рис. 39, б). Для ее решения после декодирования используются преобразователи код — аналог, называемые также цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП).

Если дискретизация была выполнена в соответствии с теоремой В. А. Котельникова, то наиболее просто преобразование код—аналог осуществляется с помощью низкочастотного фильтра. Функция $\frac{\sin \omega_b(t - n\Delta t)}{\omega_b(t - n\Delta t)}$ является откликом идеального низкочастотного фильтра на единичный импульс. Для восстановления сигнала $X(t)$ (рис. 40) необходимо подавать на вход фильтра с верхней граничной частотой ω_b последовательность коротких импульсов с амплитудами, равным мгновенным значениям сигнала в соответствующие моменты времени. Тогда на нагрузке будут суммироваться члены ряда В. А. Котельникова (см. рис. 40), обеспечивая тем самым восстановление сигнала. Качество восстановления, естественно, будет зависеть от соблюдения множества условий, таких как правильный выбор шага квантования по времени Δt , точность воспроизведения в импульсном режиме мгновенных значений сигнала, близость амплитудно-частотной характеристики фильтра к прямоугольной, а фазо-частотной — к линейной и мн. др.

Если условия теоремы В. А. Котельникова не выполняются (например, квантование по времени выполнено с неравномерным шагом), то в качестве воспроизводящих используются другие функции. С одной стороны, они должны обеспечивать необходимую точность воспроизведения сигнала при минимальном числе членов разложения, а с другой — допускать возможность про-

стой технической реализации. Последнему требованию удовлетворяют, прежде всего, *степенные полиномы*.

Задача восстановления сигнала с помощью полинома n -й степени ставится следующим образом. Пусть известны значения сигнала $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$ в моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ (см. рис. 59). Требуется найти такой непрерывный сигнал $X(t)$, который в моменты времени t_j принимал бы значения X_j .

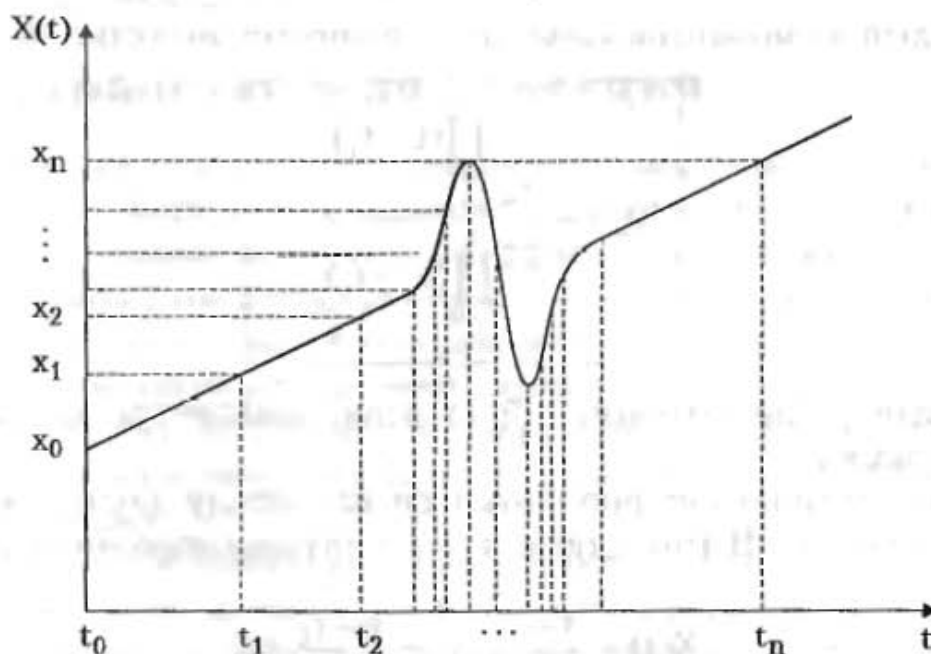


Рис. 59. К выводу интерполяционной формулы Лагранжа

Найдем прежде всего непрерывную функцию, принимающую значение 1 в момент времени t_0 и равную нулю во все остальные моменты времени t_i . Легко проверить, что такой функцией будет дробь

$$\frac{(t-t_1)(t-t_2)\dots(t-t_n)}{(t_0-t_1)(t_0-t_2)\dots(t_0-t_n)},$$

в которой при $t = t_0$ числитель и знаменатель оказываются совершенно идентичными, а в любой другой момент времени t_i один из сомножителей в числителе обращается в ноль. Умножив эту функцию на X_0 , получим непрерывный сигнал

$$X(t)_0 = \frac{(t-t_1)(t-t_2)\dots(t-t_n)}{(t_0-t_1)(t_0-t_2)\dots(t_0-t_n)} X_0,$$

принимающий значение X_0 в момент времени t_0 и равный нулю во все остальные моменты времени t_i .

Поступая по аналогии, можно сформировать сигналы

$$X(t)_j = \frac{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n (t-t_i)}{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n (t_j-t_i)} X_j,$$

принимающие значения X_j в моменты времени t_j и равные нулю во все остальные дискретные моменты времени $t_i \neq t_j$. Искомый сигнал $X(t)$ будет равен сумме этих сигналов

$$X(t) = \sum_{j=0}^n X(t)_j,$$

так как в каждый из моментов времени t_j принимает значение X_j . Формула

$$X(t) = \sum_{j=0}^n \frac{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n (t - t_i)}{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n (t_j - t_i)} X_j$$

представляющая собой полином n -й степени, называется *интерполяционной формулой Лагранжа*.

На практике обычно интерполируют сигнал между двумя соседними дискретными значениями. В этом случае $n = 1$ и интерполяционный полином имеет вид

$$X(t) = \frac{t - t_1}{t_0 - t_1} X_0 + \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} X_1,$$

или, после преобразований,

$$X(t) = at + b,$$

где

$$a = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_1 - X_0}{t_1 - t_0}; \quad b = \frac{t_1 X_0 - t_0 X_1}{t_1 - t_0}.$$

Это уравнение прямой, проходящей через точки с координатами (t_0, X_0) и (t_1, X_1) . Такая интерполяция называется *линейной*. Пример восстановления сигнала методом линейной интерполяции показан на рис. 60.

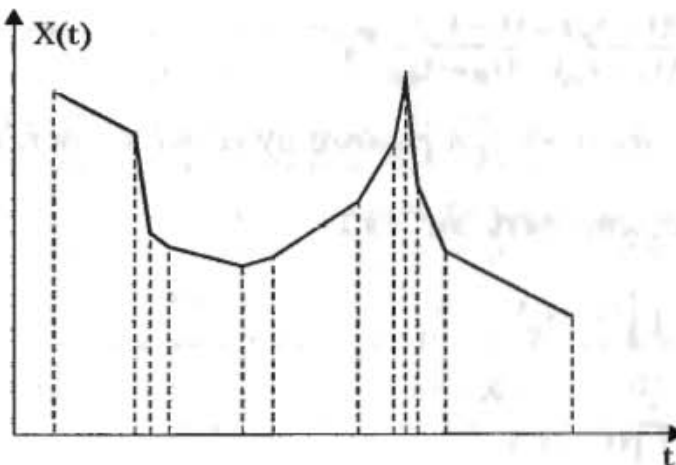


Рис. 60. Восстановление сигнала методом линейной интерполяции

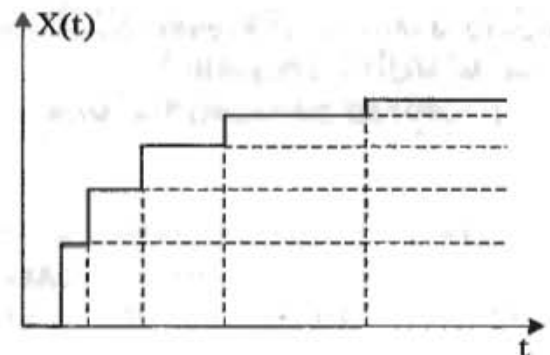


Рис. 61. Восстановление сигнала методом ступенчатой аппроксимации

При степени полинома $n = 0$ интерполяция фактически превращается в *экстраполяцию*, так как в этом случае

$$X(t) = X_0.$$

Пример восстановления сигнала таким способом в каждый дискретный момент времени t_j показан на рис. 61. Оба способа восстановления сигнала находят применение в разнообразных ЦАП.

2.8. Пространственная селекция

Как уже отмечалось, средства измерений по шкале порядка — индикаторы — используются для обнаружения сигналов на фоне маскирующих их помех. Подобные задачи возникают при обзоре окружающего пространства с целью обнаружения в нем объектов, представляющих тот или иной интерес. Если индикатор только принимает излучение объектов (звуковое, тепловое, световое, радиоизлучение), то такой режим работы называется *пассивным*. Если же в окружающее пространство излучаются зондирующие сигналы и через некоторое время принимаются сигналы, отраженные от объектов, то такой режим работы называется *активным*.

Местоположение объекта (*цели*) в пространстве определяется радиусом-вектором r , исходящим из начала координат. Длина радиуса-вектора r равна расстоянию (дистанции) до цели, а направление характеризуется угловыми координатами цели в горизонтальной и вертикальной плоскостях: азимутом φ , отсчитываемым по часовой стрелке, и углом места ψ , отсчитываемым от горизонтальной плоскости. Наиболее распространенные системы координат показаны на рис. 62, 63.

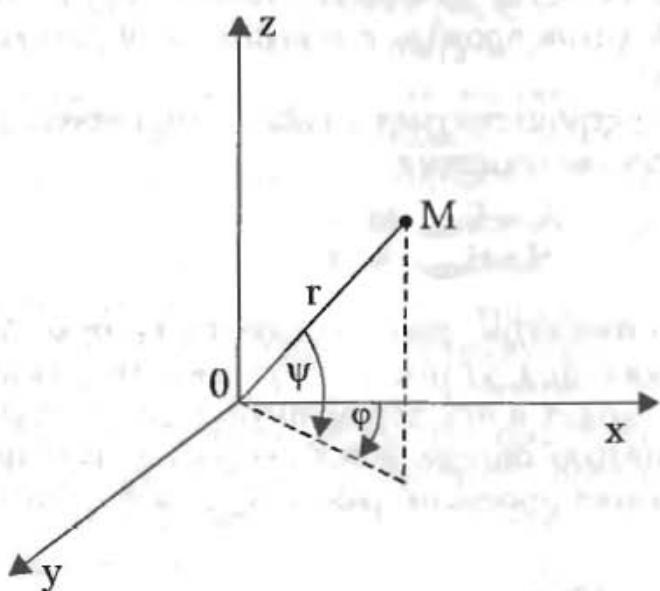


Рис. 62. Сферические координаты точки M в трехмерном пространстве

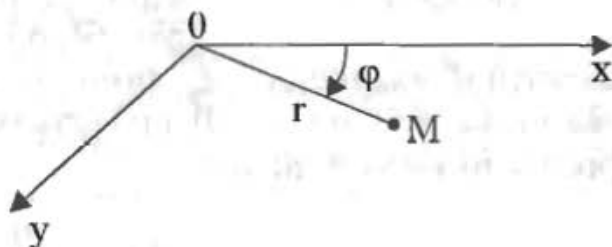


Рис. 63. Полярные координаты точки M в двухмерном пространстве

Определение направления на цель, расположенную в точке M , называется *пеленгованием*, а средства измерения плоских углов φ и ψ — *пеленгаторами*. Средства измерения расстояния (дистанции, дальности) до цели D называются

дальномерами. Определение координат цели в пространстве называют еще *пространственной селекцией*, подразделяя ее на *селекцию по дальности* и *селекцию по углу* (по пеленгу). Широкое распространение получил также термин *локация* (от лат. *locatio* — размещение, расположение; англ. *locate* — определять местонахождение; ам. *location* — обнаружение, определение местоположения).

2.8.1. Пеленгование

Естественным пеленгатором от природы является человек (оператор). Осуществляя поворот глаз, головы или всего тела вокруг вертикальной оси, он совершает обзор пространства в горизонтальной плоскости и определяет направление на интересующий его объект, измеряя органолептическим методом угол φ в выбранной системе координат. Точно так же, поднимая взгляд вверх, он производит обзор пространства в вертикальной плоскости и измеряет угол ψ между плоскостью горизонта и направлением на объект.

В технических устройствах обзор пространства совершается за счет поворота *антенны* — первичного измерительного преобразователя, обладающего направленными свойствами. Идеальное антенное устройство принимает излучение с одной стороны и не принимает с других. Избирательность по направлению реальных антенн выражена не столь явно и, говоря об их направленных свойствах, подразумевают наличие характеристики (*диаграммы*) направленности — зависимости выходного сигнала от направления на источник излучения.

Простейшим видом направленного радиоприемного устройства является *рамочная антенна*, представляющая собой виток провода в вертикальной плоскости (рис. 64, а).

Плоская электромагнитная волна с электрической и магнитной составляющими

$$\begin{aligned} E &= E_{\max} \sin \omega t; \\ H &= H_{\max} \sin \omega t, \end{aligned}$$

излучаемая источником, расположенным в точке М, падая на рамку под углом φ к плоскости рамки (рис. 64, б), наводит в ней переменную э.д.с. электро-

Рис. 64. Рамочная антенна (а) и ее диаграмма направленности в горизонтальной плоскости (б)

магнитной индукции $\sim e_p$, значение которой определяется скоростью изменения магнитного потока Φ , пронизывающего проекцию рамки $S_{\text{пр.р}}$ на плоскость фронта падающей волны:

$$e_p = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B_M S_{\text{пр.р}})}{dt}.$$

Здесь магнитная индукция $B_M = \mu_0 \mu H$, где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, μ — относительная магнитная проницаемость, в вакууме и немагнитных средах равная единице, а в ферромагнетиках — значительно ббльшая еди-

ницы; $S_{\text{пр.р}} = S \cos \varphi$, где S — площадь рамки. Выполнив дифференцирование, при $\mu = 1$ получим:

$$e_p = -\mu_0 \omega S H_{\text{max}} \cos \varphi \cos \omega t.$$

Так как $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda}$, где скорость света $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ (ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума), а для плоской электромагнитной волны выполняется условие $\sqrt{\epsilon_0} E_{\text{max}} = \sqrt{\mu_0} H_{\text{max}}$, то последнее выражение можно переписать в виде:

$$e_p = -\frac{2\pi}{\lambda} S E_{\text{max}} \cos \varphi \cos \omega t. \quad (18)$$

Если рамка состоит не из одного, а из N витков, то

$$e_p = -\frac{2\pi N}{\lambda} S E_{\text{max}} \cos \varphi \cos \omega t. \quad (19)$$

И в том, и в другом случае амплитуда высокочастотных колебаний (18), (19) зависит от направления φ на источник излучения. *Нормированная диаграмма направленности* антенного устройства в горизонтальной плоскости

$$F(\varphi) = \cos \varphi.$$

На рис. 64, б она имеет форму восьмерки (двух соприкасающихся окружностей). Это позволяет реализовать любой из двух возможных методов пеленгования: по максимуму или по минимуму принимаемого сигнала.

Пеленгование по максимуму принимаемого сигнала

Этот метод пеленгования реализуется следующим образом. В состав пеленгатора входят *антенна* с поворотным устройством, *угломерное устройство* и *индикатор*. В угломерном устройстве синхронно с вращением антенны в горизонтальной плоскости меняется угол φ между плоскостью рамки и направлением, принятым за начало отсчета азимута (рис. 65). В момент, когда напряжение на выходе приемной антенны, регистрируемое индикатором, достигает максимального значения, в угломерном устройстве снимается *отсчет* (или *показание*, если шкала отсчетного устройства проградуирована в единицах измерения азимута). Для устранения неоднозначности отсчета предусматриваются специальные меры.

Предположим, что направление на источник излучения совпадает с направлением, принятым за начало отсчета азимута (на рис. 64, 65 угол $\varphi = 0$). В этом случае напряжение на входе индикатора

$$U = k \cos \varphi = k = U_{\text{max}},$$

где k — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность напряжения; $\cos \varphi$ — коэффициент направленного действия антенны по напряженности

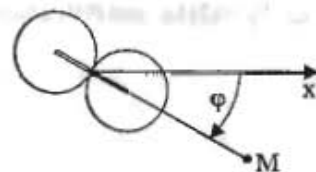


Рис. 65. Определенное направление на источник излучения по максимуму принимаемого сигнала

поля. При повороте антенны на некоторый угол φ от направления на источник излучения относительное изменение напряжения на входе индикатора будет равно

$$\frac{\Delta U}{U_{\max}} = \frac{U_{\max} - U_{\max} \cos \varphi}{U_{\max}} = 1 - \cos \varphi. \quad (20)$$

Отсюда легко найти неопределенность измерения направления на источник излучения при пеленговании по максимуму принимаемого сигнала.

Пример 25

При пеленговании рамочной антенной источника излучения по максимуму принимаемого сигнала оператор замечает изменение сигнала при уменьшении напряжения на выходе индикатора на 10 % от максимального. Чему равна неопределенность измерения направления на источник излучения?

Решение

$$1. \quad \frac{\Delta U}{U_{\max}} = 0,1 = 1 - \cos \varphi.$$

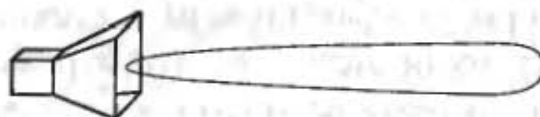
$$2. \quad \varphi = \arccos 0,9 \approx 26^\circ.$$

$$3. \quad u_\varphi = \frac{52}{2\sqrt{3}} = 15^\circ.$$

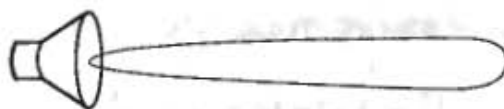
Неопределенность измерения направления на источник излучения при пеленговании по максимуму сигнала, принимаемого рамочной антенной, получается очень большой. Поэтому на практике получили распространение *апертурные* (от лат. *aperture* — отверстие) рупорные антенны с прямоугольными и круглыми раскрытиями (рис. 66). *Нормированная диаграмма направленности* прямоугольного раскрытия в главных плоскостях при падении на него плоской электромагнитной волны описывается следующими выражениями:

$$F(\varphi) = \frac{\sin\left(\frac{\pi d_r}{\lambda} \varphi\right)}{\frac{\pi d_r}{\lambda} \varphi};$$

$$F(\psi) = \frac{\sin\left(\frac{\pi d_b}{\lambda} \psi\right)}{\frac{\pi d_b}{\lambda} \psi},$$



a



b

Рис. 66. Рупорные антенны с прямоугольным (a) и круглым (b) раскрытиями

где d_r и d_v — геометрические размеры раскрыва соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Предположим вновь, что направление на источник излучения совпадает с направлением, принятым за начало отсчета угловых координат. Тогда напряжение на входе индикатора $U = U_{\max}$. При повороте антенны на некоторый угол φ от направления на источник излучения относительное изменение напряжения на входе индикатора будет равно

$$\frac{\Delta U}{U_{\max}} = \frac{U_{\max} - U_{\max} \frac{\sin x}{x}}{U_{\max}} = 1 - \frac{\sin x}{x},$$

где $x = \frac{\pi d_r}{\lambda} \varphi$. С помощью этой формулы, аналогичной формуле (20), можно найти неопределенность измерения направления на источник излучения при пеленговании по максимуму сигнала, принимаемого рупорной антенной с прямоугольным раскрывом.

Таблица 6

Функция $\frac{\sin x}{x}$

$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$
0,00	1	0,53	0,9538	1,06	0,8230	$\pi/2$	0,6366	2,10	0,4111	2,63	0,1861
0,01	1,0000	0,54	0,9521	1,07	0,8198	1,58	0,6329	2,11	0,4067	2,64	0,1821
0,02	0,9999	0,55	0,9503	1,08	0,8166	1,59	0,6288	2,12	0,4023	2,65	0,17812
0,03	0,9998	0,56	0,9485	1,09	0,8134	1,60	0,6247	2,13	0,3980	2,66	0,17413
0,04	0,9997	0,57	0,9467	1,10	0,8102	1,61	0,6206	2,14	0,3936	2,67	0,17015
0,05	0,9996	0,58	0,9449	1,11	0,8069	1,62	0,6165	2,15	0,3893	2,68	0,16618
0,06	0,9994	0,59	0,9430	1,12	0,8037	1,63	0,6124	2,16	0,3849	2,69	0,16223
0,07	0,9992	0,60	0,9411	1,13	0,8004	1,64	0,6083	2,17	0,3805	2,70	0,15829
0,08	0,9989	0,61	0,9391	1,14	0,7970	1,65	0,6042	2,18	0,3762	2,71	0,15436
0,09	0,9987	0,62	0,9372	1,15	0,7937	1,66	0,6000	2,19	0,3718	2,72	0,15045
0,10	0,9983	0,63	0,9352	1,16	0,7903	1,67	0,5959	2,20	0,3675	2,73	0,14655
0,11	0,9980	0,64	0,9331	1,17	0,7870	1,68	0,5917	2,21	0,3632	2,74	0,14266
0,12	0,9976	0,65	0,9311	1,18	0,7836	1,69	0,5875	2,22	0,3588	2,75	0,13879
0,13	0,9972	0,66	0,9290	1,19	0,7801	1,70	0,5833	2,23	0,3545	2,76	0,13493
0,14	0,9967	0,67	0,9268	1,20	0,7767	1,71	0,5791	2,24	0,3501	2,77	0,13108
0,15	0,9963	0,68	0,9247	1,21	0,7732	1,72	0,5749	2,25	0,3458	2,78	0,12725
0,16	0,9957	0,69	0,9225	1,22	0,7698	1,73	0,5707	2,26	0,3415	2,79	0,12344
0,17	0,9952	0,70	0,9203	1,23	0,7663	1,74	0,5665	2,27	0,3372	2,80	0,11964

продолжение ↗

Таблица 6 (продолжение)

$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$
0,18	0,9946	0,71	0,9181	1,24	0,7627	1,75	0,5623	2,28	0,3328	2,81	0,11585
0,19	0,9940	0,72	0,9158	1,25	0,7592	1,76	0,5580	2,29	0,3285	2,82	0,11208
0,20	0,9933	0,73	0,9135	1,26	0,7556	1,77	0,5538	2,30	0,3242	2,83	0,10833
0,21	0,9927	0,74	0,9112	1,27	0,7520	1,78	0,5495	2,31	0,3199	2,84	0,10459
0,22	0,9920	0,75	0,9089	1,28	0,7484	1,79	0,5453	2,32	0,3156	2,85	0,10087
0,23	0,9912	0,76	0,9065	1,29	0,7448	1,80	0,5410	2,33	0,3113	2,86	0,09716
0,24	0,9904	0,77	0,9041	1,30	0,7412	1,81	0,5368	2,34	0,3070	2,87	0,09347
0,25	0,9896	0,78	0,9016	1,31	0,7375	1,82	0,5325	2,35	0,3028	2,88	0,08980
0,26	0,9888	0,79	0,8992	1,32	0,7339	1,83	0,5282	2,36	0,2985	2,89	0,08614
0,27	0,9879	0,80	0,8967	1,33	0,7302	1,84	0,5239	2,37	0,2942	2,90	0,08250
0,28	0,9870	0,81	0,8942	1,34	0,7265	1,85	0,5196	2,38	0,2899	2,91	0,07888
0,29	0,9860	0,82	0,8916	1,35	0,7228	1,86	0,5153	2,39	0,2857	2,92	0,07527
0,30	0,9851	0,83	0,8891	1,36	0,7190	1,87	0,5110	2,40	0,2814	2,93	0,07168
0,31	0,9841	0,84	0,8865	1,37	0,7153	1,88	0,5067	2,41	0,2772	2,94	0,06811
0,32	0,9830	0,85	0,8839	1,38	0,7115	1,89	0,5024	2,42	0,2730	2,95	0,06455
0,33	0,9819	0,86	0,8812	1,39	0,7077	1,90	0,4981	2,43	0,2687	2,96	0,06101
0,34	0,9808	0,87	0,8785	1,40	0,7039	1,91	0,4937	2,44	0,2645	2,97	0,05749
0,35	0,9797	0,88	0,8758	1,41	0,7001	1,92	0,4894	2,45	0,2603	2,98	0,05399
0,36	0,9785	0,89	0,8731	1,42	0,6962	1,93	0,4851	2,46	0,2561	2,99	0,05051
0,37	0,9773	0,90	0,8704	1,43	0,6924	1,94	0,4807	2,47	0,2519	3,00	0,04704
0,38	0,9761	0,91	0,8676	1,44	0,6885	1,95	0,4764	2,48	0,2477	3,01	0,04359
0,39	0,9748	0,92	0,8648	1,45	0,6846	1,96	0,4720	2,49	0,2436	3,02	0,04016
0,40	0,9735	0,93	0,8620	1,46	0,6807	1,97	0,4677	2,50	0,2394	3,03	0,03675
0,41	0,9722	0,94	0,8591	1,47	0,6768	1,98	0,4634	2,51	0,2352	3,04	0,03336
0,42	0,9709	0,95	0,8562	1,48	0,6729	1,99	0,4590	2,52	0,2311	3,05	0,02999
0,43	0,9795	0,96	0,8533	1,49	0,6690	2,00	0,4546	2,53	0,2269	3,06	0,02663
0,44	0,9680	0,97	0,8504	1,50	0,6650	2,01	0,4503	2,54	0,2228	3,07	0,02330
0,45	0,9666	0,98	0,8474	1,51	0,6610	2,02	0,4459	2,55	0,2187	3,08	0,01998
0,46	0,9651	0,99	0,8445	1,52	0,6570	2,03	0,4416	2,56	0,2146	3,09	0,016689
0,47	0,9636	1,00	0,8415	1,53	0,6531	2,04	0,4372	2,57	0,2105	3,10	0,013413
0,48	0,0620	1,01	0,8384	1,54	0,6490	2,05	0,4329	2,58	0,2064	3,11	0,010157
0,49	0,9605	1,02	0,8354	1,55	0,6450	2,06	0,4285	2,59	0,2023	3,12	0,006920
0,50	0,9589	1,03	0,8323	1,56	0,6410	2,07	0,4241	2,60	0,1983	3,13	0,003704

$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$	$\pm x$	$\frac{\sin x}{x}$
0,51	0,9572	1,04	0,8292	1,57	0,6369	2,08	0,4198	2,61	0,1942	3,14	0,0005072
00,52	0,9555	1,05	0,8261	$\pi/2$	0,6366	2,09	0,4154	2,62	0,1902	π	0

Пример 26

При пеленговании рупорной антенной с прямоугольным раскрывом источника излучения по максимуму принимаемого сигнала оператор замечает изменение сигнала при уменьшении напряжения на выходе индикатора на 10 % от максимального. Чему равна неопределенность измерения направления на источник излучения, если $d_r = \lambda$?

Решение

$$1. \frac{\Delta U}{U_{\max}} = 0,1 = 1 - \frac{\sin x}{x}.$$

$$2. \frac{\sin x}{x} = 0,9; \text{ по табл. 6 находим } x = 0,79.$$

$$3. \pi\varphi = 0,79; \text{ отсюда } \varphi = 0,25 \text{ рад} = 14,33^\circ.$$

$$4. u_\varphi = \frac{28,66}{2\sqrt{3}} = 8,27^\circ.$$

При увеличении размера прямоугольного раскрыва неопределенность измерения направления на источник излучения при пеленговании по максимуму принимаемого сигнала уменьшается в $\frac{d_r}{\lambda}$ раз по сравнению с результатом, полученным в примере 26. Это побуждает применять более сложные остронаправленные антенные устройства с рефлекторами (рис. 67, а) и контррефлекторами (рис. 67, б). Апертура (раскрыв) таких антенн $\frac{d}{\lambda}$ достигает $2 \cdot 10^4$ и более.

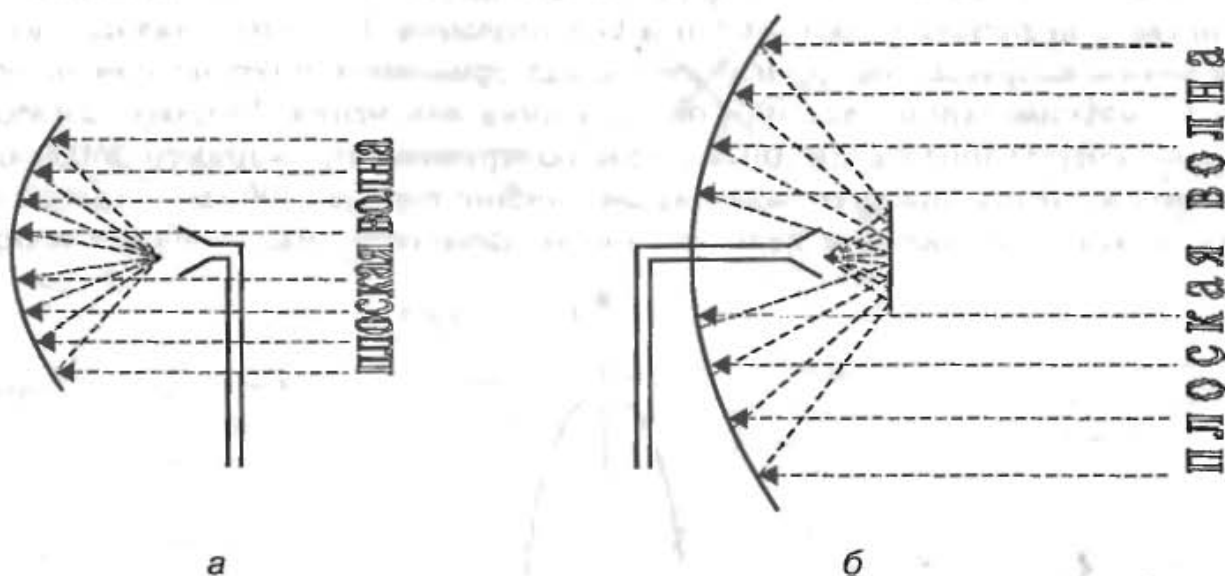


Рис. 67. Рефлекторные антенны

На рис. 68 приведена фотография радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории в Симеизе. Работающий в миллиметровом диапазоне радиоволн, радиотелескоп имеет диаметр параболического рефлектора 22 м.

Апертура Большого Пулковского радиотелескопа в горизонтальной плоскости составляет 10^3 в десятисантиметровом и $1,7 \cdot 10^3$ в трехсантиметровом диапазонах радиоволн.

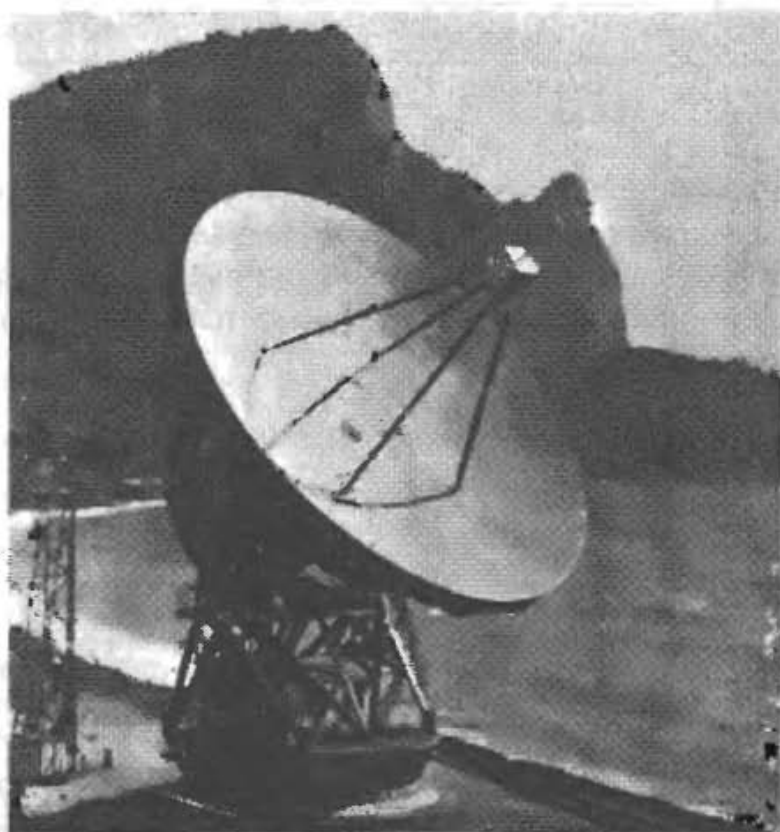


Рис. 68. Радиотелескоп РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории

Функция преобразования (пеленгационная характеристика) пеленгаторов, измеряющих направление на источник излучения по максимуму принимаемого сигнала, совпадает по форме с диаграммой направленности антенны. Для случая, показанного на рис. 64, она представлена на рис. 69. Вполне очевидны достоинства и недостатки такого метода пеленгования. С одной стороны, по оси диаграммы направленности антенны сигнал принимается без потери энергии, т. е. на максимальном удалении от источника излучения. Гидроакустические станции современных подводных лодок обнаруживают, например, надводные цели в режиме шумопеленгования на расстоянии порядка 100 км. С другой стороны, в этом направлении пеленгационная характеристика наиболее пологая

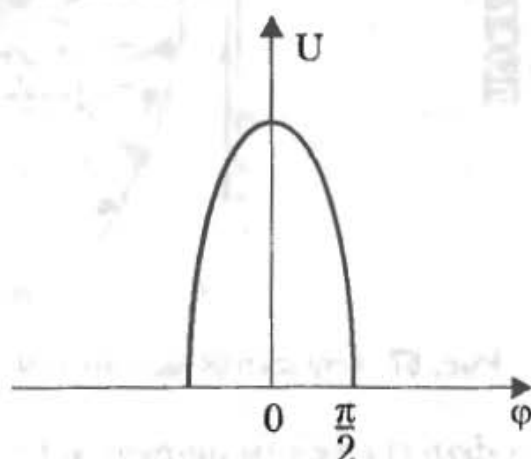


Рис. 69. Пеленгационная характеристика рамочной антенны

и неопределенность измерения пеленга (угла φ) самая большая. Желательно было бы проводить измерения в окрестности угла $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Кроме того, при неподвижной антенне и уменьшении U на ΔU от U_{\max} невозможно судить о направлении углового перемещения источника излучения.

Ценой уменьшения дальности пеленгования два последних недостатка преодолеваются при пеленговании по минимуму принимаемого сигнала.

Пеленгование по минимуму принимаемого сигнала

При этом методе пеленгования отсчет или показание снимаются в момент, когда напряжение на выходе приемной антенны, регистрируемое индикатором, достигает минимального значения (рис. 70). Крутизна пеленгационной характеристики в этот момент максимальна, и неопределенность измерения пеленга получается минимальной. Однако при этом теряется контакт с целью, что крайне нежелательно. Компромиссом является равносигнальный метод пеленгования, суть которого можно пояснить на примере использования антенного устройства, состоящего из двух идентичных рамок I и II, пересекающихся под прямым углом (рис. 71). Если подобное антенное устройство ориентировано так, как показано на рис. 71, и направление на источник излучения совпадает с направлением, принятым за начало отсчета азимута ($\Delta\varphi = 0$), то напряжение на выходе первой антенны

$$U_I = k \cos \frac{\pi}{4} = k \frac{\sqrt{2}}{2},$$

второй —

$$U_{II} = k \cos \left(-\frac{\pi}{4} \right) = k \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

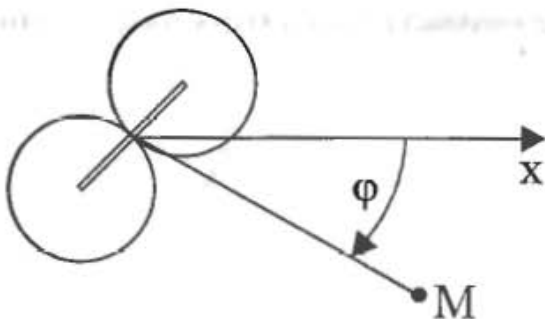


Рис. 70. Определение направления на источник излучения по минимуму принимаемого сигнала

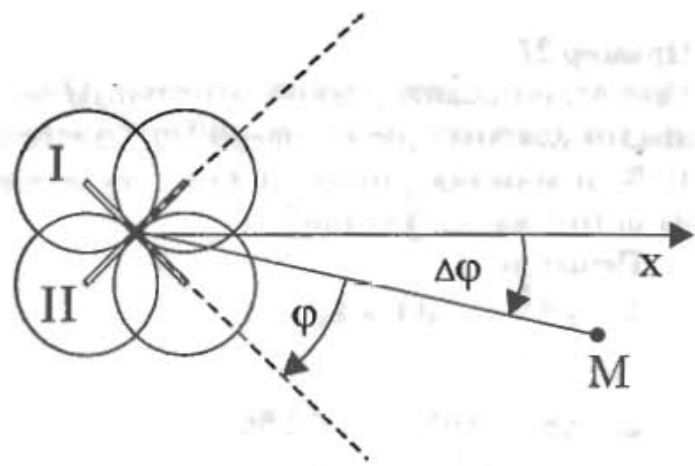


Рис. 71. Антенна пеленгатора, состоящая из двух пересекающихся рамок во взаимно перпендикулярных плоскостях

При вращении антенной системы в приемном устройстве напряжения U_I и U_{II} сравниваются между собой, и в момент, когда (как показано на рис. 71)

$$\Delta U = U_I - U_{II} = 0,$$

по шкале угломерного устройства снимается отсчет или показание. При отклонении направления на источник излучения на $\Delta\varphi$ напряжение U_I увеличивается:

$$U_I = k \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \Delta_I \right),$$

а напряжение U_{II} уменьшается:

$$U_{II} = k \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \Delta_{II} \right),$$

в результате чего появляется разностный сигнал

$$\Delta U = U_I - U_{II} = k (\Delta_I + \Delta_{II}).$$

Для малого угла $\Delta\varphi$ можно принять

$$\Delta_I \approx \Delta_{II} \approx \left| \frac{\partial F\varphi}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\frac{\pi}{4}} \Delta\varphi = \sin \frac{\pi}{4} \cdot \Delta\varphi.$$

Тогда относительная разность напряжений в двух идентичных каналах

$$\frac{\Delta U}{U_{\varphi=\frac{\pi}{4}}} = 2 \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\cos \frac{\pi}{4}} \Delta\varphi = 2 \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \cdot \Delta\varphi = 2\Delta\varphi.$$

По формуле

$$\frac{\Delta U}{U_{\varphi=\frac{\pi}{4}}} = 2\Delta\varphi,$$

аналогичной формуле (20), можно найти неопределенность измерения направления на источник излучения при равносигнальном методе пеленгования с помощью двух взаимно перпендикулярных рамок.

Пример 27

При пеленговании равносигнальным методом с помощью двух взаимно перпендикулярных рамок оператор замечает увеличение разностного сигнала на 10 % от минимального. Чему равна неопределенность измерения направления на источник излучения?

Решение

$$1. \frac{\Delta U}{U_{\varphi=\frac{\pi}{4}}} = 0,1 = 2\Delta\varphi.$$

$$2. \Delta\varphi = 0,05 \text{ рад} = 2,86^\circ.$$

$$3. u_\varphi = \frac{5,72}{2\sqrt{3}} = 1,65^\circ.$$

Сравнивая результаты, полученные в примерах 25 и 27, можно заключить, что пеленгование равносигнальным методом обеспечивает на порядок более высокую точность, чем пеленгование по максимуму принимаемого сигнала.

У остронаправленных антенн с параболическими рефлекторами двухлепестковая диаграмма направленности для пеленгования равносигнальным методом получается путем небольших конструктивных изменений (см., например, рис. 72). Для синфазного прямоугольного раскрыва с нормированной диаграммой направленности

$$F(\varphi) = \frac{\sin x}{x},$$

$$\frac{\Delta U}{U_{\varphi_0}} = 2 \left| \frac{\partial F(\varphi)}{\partial \varphi} \right|_{\varphi_0} \cdot \Delta \varphi = 2 \left| \frac{x_0 \cos x_0 - \sin x_0}{x_0 \sin x_0} \frac{\partial x}{\partial \varphi} \right| \Delta \varphi = 2 \left| \operatorname{ctg} x_0 - \frac{1}{x_0} \right| \frac{\pi d}{\lambda} \Delta \varphi,$$

где $x_0 = \frac{\pi d}{\lambda} \varphi_0$; $\varphi_0 = \frac{\theta}{2}$, а θ — угол между осями диаграмм направленности. Приняв, что диаграммы направленности пересекаются на уровне 0,75, получим: $\frac{\sin x}{x} = 0,75$. По табл. 6 найдем, что $x_0 = 1,27$. Тогда

$$\frac{\Delta U}{U_{\varphi_0}} = 3,5 \frac{d}{\lambda} \Delta \varphi.$$

Пример 28

При пеленговании равносигнальным методом с помощью параболической антенны оператор замечает увеличение разностного сигнала на 10 % от минимального. Чему равна неопределенность измерения направления на источник излучения при апертуре антенны $\frac{d}{\lambda} = 100$?

Решение

$$1. \quad \frac{\Delta U}{U_{\varphi_0}} = 0,1 = 350 \Delta \varphi.$$

$$2. \quad \delta \varphi = 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = 16,4 \cdot 10^{-3} \text{°}.$$

$$3. \quad \alpha_{\varphi} = \frac{32,8 \cdot 10^{-3}}{2\sqrt{3}} = 0,01 \text{°}.$$

Функция преобразования (пеленгационная характеристика) пеленгаторов, измеряющих направление на источник излучения равносигнальным методом,

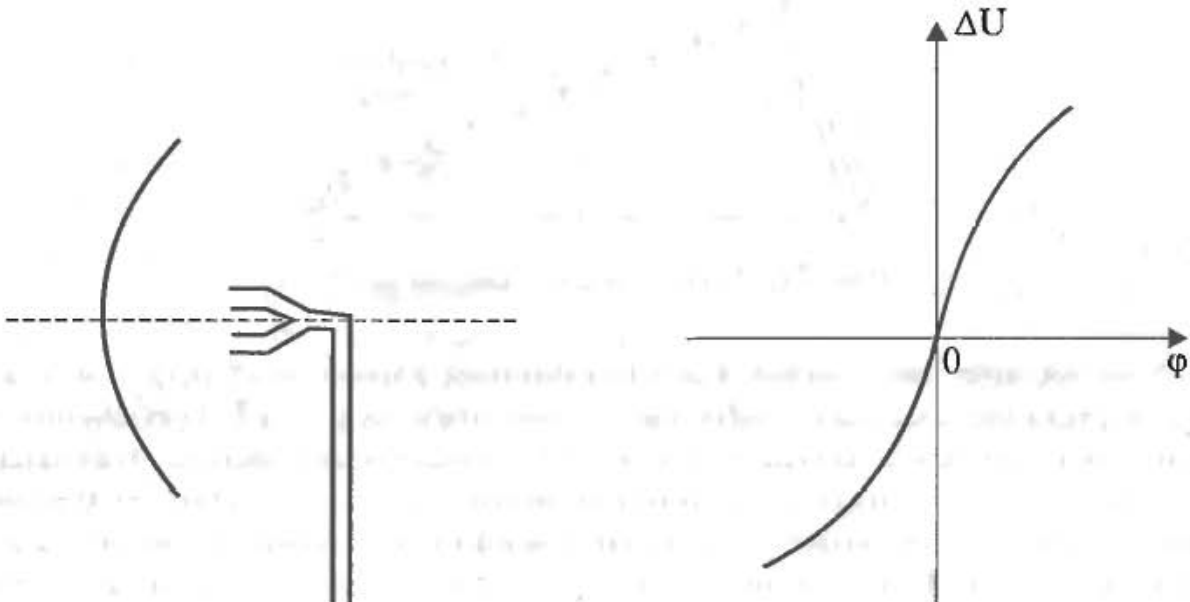


Рис. 72. Антенное устройство для получения равносигнального направления в сантиметровом диапазоне радиоволн

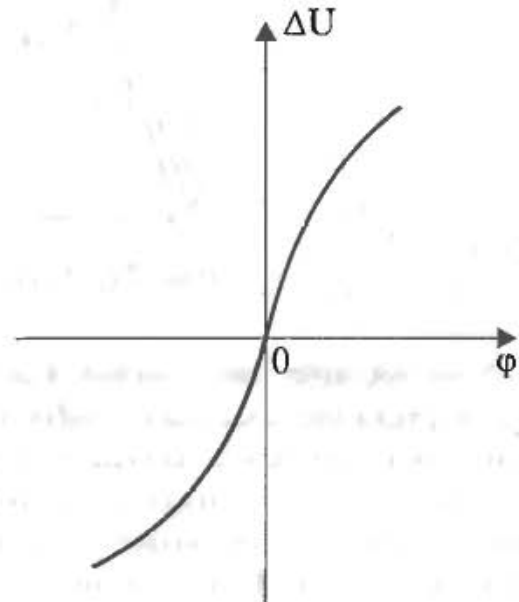


Рис. 73. Пеленгационная характеристика при равносигнальном методе пеленгования

имеет вид, показанный на рис. 73, где угол φ отсчитывается от начала отсчета угловой координаты до равносигнального направления. Благодаря ее крутизне равносигнальный метод пеленгования применяется для точного определения направления на цель, ее сопровождения и выдачи целеуказания, в то время как пеленгование по максимуму принимаемого сигнала используется для обнаружения целей и определения направления на них на максимальной дальности.

Фазовый метод пеленгования

Недостатков двух рассмотренных методов лишен фазовый метод пеленгования, идею которого рассмотрим на примере применения двух ненаправленных антенн A_1 и A_2 , расположенных на расстоянии b (называемом *базой*) одна от другой (рис. 74). Сигнал от источника излучения принимается антенной A_1 позже, чем антенной A_2 , на время

$$t = \frac{\Delta R}{c} = \frac{b \sin \varphi}{c},$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн. Это запаздывание соответствует задержке высокочастотных колебаний по фазе на

$$\Delta \varphi = \omega t = 2\pi f \frac{b \sin \varphi}{c} = 2\pi \frac{b}{\lambda} \sin \varphi.$$

Измерив фазометром фазовую задержку $\Delta \varphi$, можно рассчитать пеленг φ на источник излучения, отсчитываемый от нормали к базе.

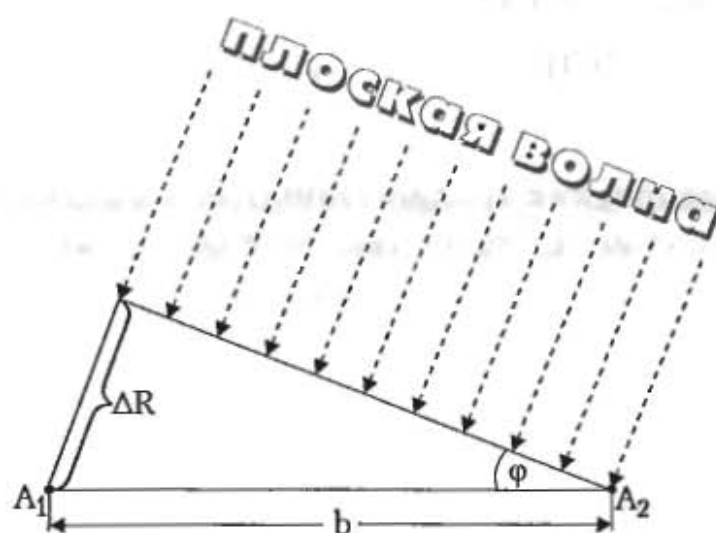


Рис. 74. Пеленгование фазовым методом

Функция преобразования (пеленгационная характеристика), построенная по этой формуле, сходна с графиком, показанным на рис. 73. Требование однозначности отсчета накладывает на область применения метода значительные ограничения. Кроме того, этот метод пеленгования не обладает *разрешающей способностью*, т. е. возможностью раздельного пеленгования нескольких источников излучения. Тем не менее он находит применение в сочетании с методом

пеленгования по максимуму принимаемого сигнала, а также равносигнальным методом при использовании остронаправленных антенн.

Как и любые другие средства измерений, пеленгаторы подлежат всем видам метрологического обслуживания (см. главу 3), включая испытания, периодическую поверку или калибровку.

2.8.2. Измерение расстояния

Прежде всего отметим, что расстояние до источника излучения можно определить триангуляционным методом, измерив направление на него из двух точек, расстояние между которыми известно. Так, взяв пеленги на маяк, расположенный в точке С, из точек А и В, расстояние АВ между которыми известно (рис. 75), с корабля, следующего прямым курсом, можно рассчитать расстояния до маяка АС и ВС по теореме синусов:

$$AC = AB \frac{\sin(180^\circ - \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)};$$

$$BC = AB \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

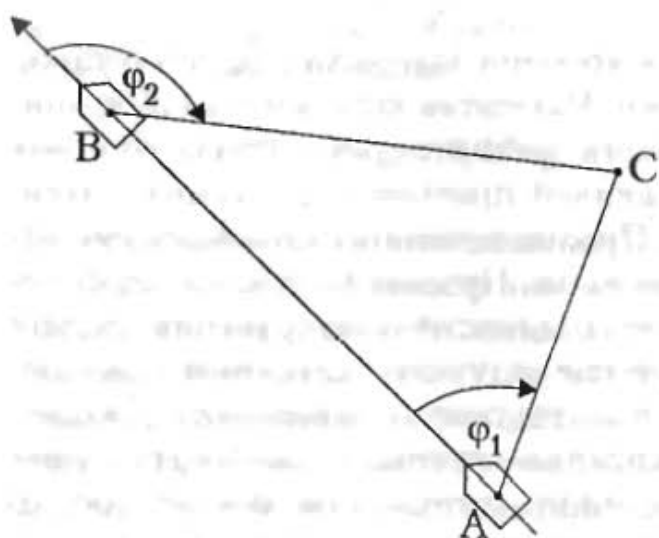


Рис. 75. Триангуляционный метод определения дальности

Однако это требует времени на преодоление расстояния АВ и точного измерения этого расстояния. Поэтому триангуляционный метод чаще применяется для определения расстояния от точки С до триангуляционных пунктов — стационарных ориентиров на местности, расположенных в точках А и В, расстояние между которыми известно. В морской навигации в качестве триангуляционных знаков используются маяки, в авиации — радиомаяки.

Как уже отмечалось на с. 105, режим измерения, при котором не производится излучение сигналов в окружающее пространство, называется *пассивным*. Если же в окружающее пространство излучаются *зондирующие* сигналы и принимаются *отраженные* от удаленных объектов, то такой режим работы называется *активным*. Зная скорость распространения сигналов c , в активном режиме можно определить расстояние (дальность) D до отражающего объекта, измерив время задержки t_3 между моментом излучения зондирующего сигнала и моментом прихода отраженного:

$$D = c \frac{t_3}{2}. \quad (21)$$

Простейшим примером служит использование явления эхо; скорость распространения звука в воздухе при температуре 0 °С равна 331 м/с. При измерении глубины корабельным эхолотом $c = 1510 \dots 1550$ м/с при температуре морской воды 17 °С. При измерении высоты полета самолета лазерным высотомером $c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с.

Если в первом приближении считать скорость распространения сигнала физической константой, то неопределенность D зависит только от неопределенности измерения t_z . Для измерения, например, высоты полета самолета радиовысотомером со стандартной неопределенностью по типу В, равной 15 м, стандартная неопределенности измерения времени должна быть

$$u_{t_z} = \sqrt{\left(\frac{\partial 2D}{\partial t_z} u_D \right)^2} = \frac{2u_D}{c} = \frac{2 \cdot 15}{3 \cdot 10^8} = 10^{-7} \text{ с} = 0,1 \text{ мкс.}$$

На практике находят применение три метода или способа измерения времени задержки.

Импульсный метод

В импульсных дальномерах для измерения времени задержки обычно используется развертка электронно-лучевой трубки. Развертка запускается синхронизатором одновременно с посылкой импульсного зондирующего сигнала, во время которой приемник, работающий от совмещенной приемно-передающей антенны, запирается антенным переключателем. Прохождение сигналов в режиме передачи показано на рис. 76 сплошными линиями. Просачивающийся через антенный переключатель незначительный по мощности зондирующий сигнал просматривается в начале развертки. После его излучения антенный переключатель отключает антенну от передатчика и подключает к приемнику. Дальномерное устройство переходит в режим ожидания—приема отраженных сигналов. В режиме приема прохождение отраженного сигнала показано на рис. 76 пунктирными линиями. На экране электронно-лучевой трубки отраженный сигнал просматривается на некотором удалении от начала развертки. Это расстояние d при постоянной скорости развертки v зависит от времени задержки:

$d = vt_z$. Так как $v = \frac{d_{\max}}{t_{\max}}$, где d_{\max} и t_{\max} — соответственно длина и длительность развертки, то $d = \frac{d_{\max}}{t_{\max}} \frac{2D}{c}$. Здесь $\frac{ct_{\max}}{2} = D_{\max}$ — максимальная дальность действия дальномера. Поэтому $d = \frac{d_{\max}}{D_{\max}} D$, или, окончательно,

$$d = mD,$$

где $m = \frac{d_{\max}}{D_{\max}}$ — масштаб, в котором отображается на линии развертки измеряемое расстояние. Таким образом, линия развертки может быть проградуирована непосредственно в единицах измерения дистанции.

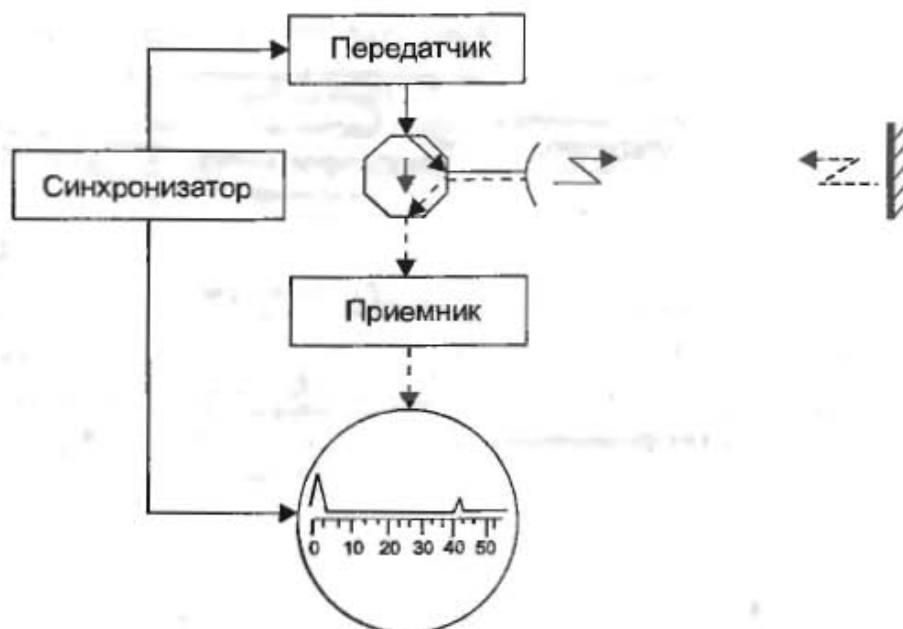


Рис. 76. Структурная схема и принцип действия импульсного дальномера

Циклы излучения и приема сигналов повторяются с частотой следования зондирующих импульсов. Период следования зондирующих импульсов $T_{з.и.}$ больше t_{max} на время обратного хода развертки, которое составляет примерно $0,25 t_{max}$. Таким образом,

$$T_{з.и.} = t_{max} + 0,25 t_{max} = 1,25 t_{max} = 1,25 \frac{2D_{max}}{c} = 2,5 \frac{D_{max}}{c}.$$

Это условие, обеспечивающее однозначность определения дальности.

Отсчет с экрана электронно-лучевой трубки снимается с помощью механической шкалы с масштабными делениями, как это показано на рис. 76. Более высокая точность отсчета достигается в случае применения вместо делений шкалы электронных меток дальности, которые могут иметь форму остроугольных импульсов на параллельной развертке, или яркостных отметок. Широко используются преобразователи дальности в цифровой код, упрощающие дальнейшую обработку, передачу и использование измерительной информации.

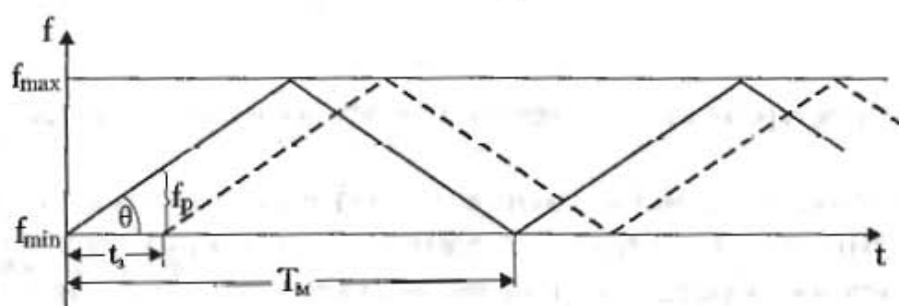
Частотный метод

При частотном методе измерения времени задержки дальномер работает в режиме непрерывного излучения, так что для приема отраженных сигналов необходимо иметь отдельную приемную антенну (рис. 77, а). Прохождение сигналов в режиме передачи показано на рис. 77 сплошными линиями. Частота излучения меняется модулятором по линейному (в частности пилообразному, как показано на рис. 77, б,) или, например, синусоидальному, как показано на рис. 47, закону. Отраженное частотно-модулированное излучение с задержкой на время t_2 поступает в приемную антенну и, будучи преобразованным в напряжение, смешивается в приемнике с ослабленным поглощающим аттенюатором частотно-модулированным напряжением, вырабатываемым в этот момент передатчиком.

Прохождение сигналов в режиме приема показано на рис. 77 пунктирными линиями. Разностная частота $f_p = f_{перед} - f_{прием}$ выделяется спектроанализатором.



a



б

Рис. 77. Структурная схема и принцип действия частотного дальномера

Однозначность отсчета f_p обеспечивается, если $\frac{f_p}{t_3} = \operatorname{tg}\theta = \frac{\Delta f}{\frac{T_M}{2}}$, где $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ — девиация частоты. Отсюда $f_p = \frac{\Delta f}{\frac{T_M}{2}} t_3 = \frac{\Delta f}{\frac{T_M}{2}} \frac{2D}{c}$, или окончательно:

$$f_p = \frac{4\Delta f}{c} F_M D,$$

где F_M — частота модуляции. Таким образом, если разностная частота f_p измеряется частотомером, то его шкала может быть проградуирована непосредственно в единицах измерения дистанции.

Неопределенность измерения дальности цифровыми частотомерами определяется в основном шириной полосы пропускания их селективных фильтров. Если обозначить эту ширину полосы пропускания через ΔF_ϕ , то стандартная неопределенность типа В (или по типу В) показания частотомера будет $u_{f_p} = \frac{\Delta F_\phi}{2\sqrt{3}}$, а стандартная неопределенность D по типу В соответственно

$$u_D = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{c\Delta F_\phi}{4\Delta f \cdot F_M}.$$

Частотные дальномеры по сравнению с импульсными не требуют больших мощностей (в импульсе) и высоких напряжений. Вследствие этого они обладают

меньшими габаритами и массой, что обуславливает их широкое применение в авиационной и ракетной технике (в качестве высотомеров — альтиметров — самолетов, стабилизаторов высоты полета, первичных измерительных преобразователей в головках самонаведения ракет).

Фазовый метод

Как и при частотном методе измерения времени задержки, дальномер работает в режиме непрерывного излучения, откуда вытекает необходимость использования двух антенн: приемной и передающей (рис. 78).

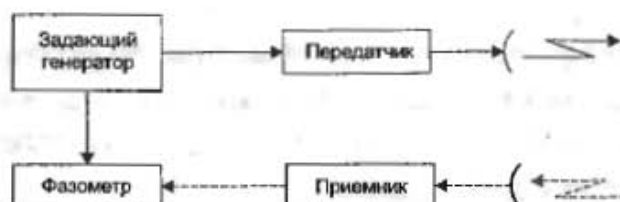


Рис. 78. Структурная схема фазового дальномера

Напряжение на входе передающей антенны

$$u_{\text{нал}} = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

на выходе приемной антенны

$$u_{\text{пр}} = U_{m2} \sin[\omega(t - t_s) + \varphi_0 - \varphi_{\text{отр}}],$$

где $\varphi_{\text{отр}}$ — изменение фазы при отражении. Разность фаз, измеряемая фазометром,

$$\varphi_p = \omega t_s + \varphi_{\text{отр}} + \varphi_{\text{сх}},$$

где изменением фазы при отражении $\varphi_{\text{отр}}$ и фазовой задержкой в схеме приемного устройства $\varphi_{\text{сх}}$ в первом приближении можно пренебречь. Тогда

$$\varphi_p \approx 2\frac{\omega}{c}D,$$

и шкалу отсчетного устройства фазометра можно было бы уже градуировать непосредственно в единицах измерения дистанции, если бы не одно обстоятельство. Дело в том, что из условия однозначности отсчета $\varphi_p \leq 2\pi$ вытекает:

$$D_{\text{max}} = \frac{2\pi c}{2\omega} = \frac{\pi c}{2\pi f} = \frac{\lambda}{2},$$

что совершенно неприемлемо. Выход из положения был найден академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси в 1930 г. Он состоит в одновременной работе фазового дальномера на двух близких частотах ω_1 и ω_2 . В этом случае

$$\varphi_{p1} + 2\pi N_1 = \omega_1 t_s + \varphi_{\text{отр}1} + \varphi_{\text{сх}1};$$

$$\varphi_{p2} + 2\pi N_2 = \omega_2 t_s + \varphi_{\text{отр}2} + \varphi_{\text{сх}2},$$

где N_1 и N_2 — целое число периодов излучения соответственно на первой и второй частоте. Тогда

$$\varphi_{p1} - \varphi_{p2} + 2\pi(N_1 - N_2) = (\omega_1 - \omega_2)t_3 + \varphi_{отр1} - \varphi_{отр2} + \varphi_{сх1} - \varphi_{сх2}.$$

Из того, что $\omega_1 \approx \omega_2$, следует, что $N_1 - N_2 \approx 0$; $\varphi_{отр1} \approx \varphi_{отр2}$; $\varphi_{сх1} \approx \varphi_{сх2}$. Введя обозначения $\varphi_{p1} - \varphi_{p2} = \psi_p$; $\omega_1 - \omega_2 = \omega_p$, получим:

$$\psi_p = \omega_p t_3 = 2 \frac{\omega_p}{c} D.$$

Шкалу отсчетного устройства фазометра, измеряющего ψ_p , уже можно градуировать в единицах измерения дистанции, так как ввиду очень малого значения ω_p , условие однозначности отсчета $\psi_p \leq 2\pi$ обеспечивает вполне приемлемую дальность действия дальномера

$$D_{\max} = \frac{\lambda_p}{2}.$$

Неопределенность измерения дальности фазовыми дальномерами

$$u_D = \frac{1}{2} \frac{c}{\omega_p} u_{\psi_p}$$

определяется в основном неопределенностью показания фазометра, т. е. очень невелика. По этой причине фазовые дальномеры успешно применяются в геодезии, картографии, гидрографии, навигации и других областях, где требуется высокая точность измерения расстояний.

Все типы дальномеров, как и любые другие средства измерений, подлежат метрологическому обслуживанию (см. главу 3), включая испытания, периодическую поверку или калибровку.

2.8.3. Измерение скорости

Скорость и направление перемещения излучающего объекта можно определить при длительном наблюдении за изменением его пространственных координат (направления на объект и дистанции до него). Однако во многих случаях, особенно при стремительном сближении с объектом, длительное наблюдение неприемлемо. В этих случаях скорость изменения расстояния до объекта измеряется с помощью эффекта, открытого в 1842 г. австрийским физиком Х. Доплером и носящего его имя.

Суть эффекта Доплера рассмотрим на примере регистрации звуковых волн, излучаемых источником, расположенным в точке А, приближающимся к нему приемником, расположенным в точке В (рис. 79). Одни и те же фазы излучаемых волн, например максимумы звукового давления, следуют одна за другой на расстоянии $\lambda = cT$ друг от друга, где $T = \frac{1}{f}$ — период звуковых колебаний.

Если бы расстояние между источником и приемником не менялось, период $T_{пр}$ и частота $f_{пр}$ звуковых колебаний, воспринимаемых приемником, равнялись бы

периоду T и частоте f звуковых колебаний, излучаемых источником. Если же приемник приближается к источнику со скоростью v , то расстояние λ между фазовыми фронтами преодолевается за время $T_{\text{пр}} = \frac{\lambda}{c+v} = \frac{cT}{c+v}$. Переходя

к частотам, получим: $\frac{1}{f_{\text{пр}}} = \frac{c \frac{1}{f}}{c+v} = \frac{c}{f(c+v)}$, или окончательно: $f_{\text{пр}} = f + F_{\text{д}}$, где $F_{\text{д}} = f \frac{v}{c}$ — частота Доплера.

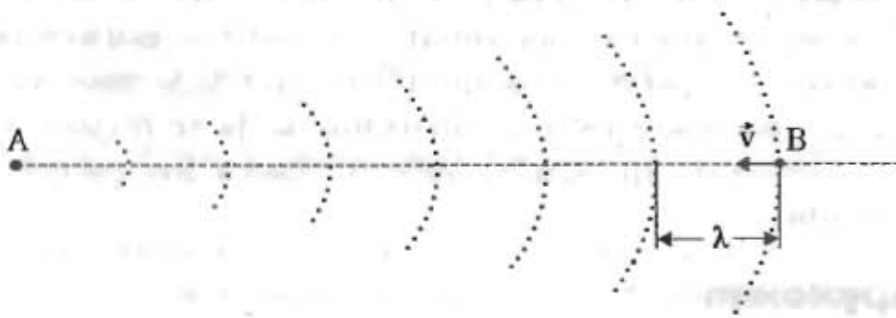


Рис. 79. К пояснению эффекта Доплера

При увеличении расстояния между источником и приемником излучения доплеровское смещение частоты получается отрицательным, так что в общем случае

$$f_{\text{пр}} = f \pm F_{\text{д}}$$

В получивших наибольшее распространение радиолокационных системах измерения скорости цели эффект Доплера возникает дважды: при облучении движущейся цели и при переизлучении ею электромагнитного излучения в обратном направлении. Соответственно

$$F_{\text{д}} = 2f \frac{v}{c}$$

Упрощенная структурная схема радиолокационного измерителя скорости приведена на рис. 80. Напряжения из приемного и передающего трактов, отличающиеся по частоте на $F_{\text{д}}$, подаются на смеситель, после чего разностная частота $F_{\text{д}}$ выделяется и измеряется спектроанализатором-частотомером, шкала отсчетного устройства которого может быть проградуирована непосредственно в единицах измерения скорости цели.

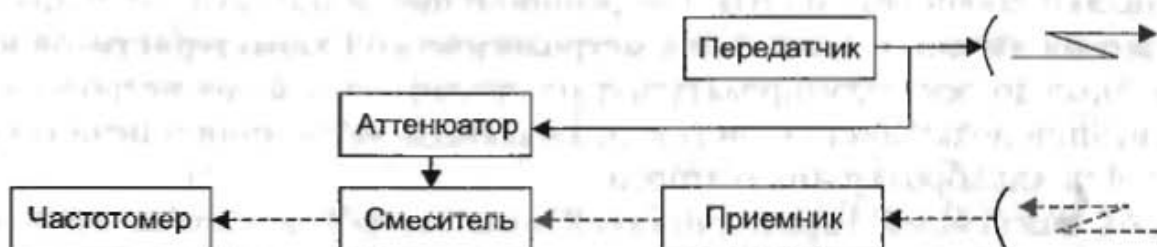


Рис. 80. Структурная схема радиолокационного измерителя скорости

Как и все средства измерений, измерители скорости подлежат метрологическому обслуживанию (см. главу 3), включающему испытания, периодическую поверку или калибровку.

2.8.4. Основы теории локационных систем

Современные локационные системы (гидроакустические и радиолокационные станции — ГАС и РЛС, лазерные локации) сочетают в себе функции пеленгаторов, и дальномеров, и измерителей скорости. Их основным (но не единственным) назначением является обнаружение объектов (целей) на максимальной дальности, определение их координат и элементов движения (курса и скорости). Таким образом, в работе локационных систем можно выделить два основных режима: *режим обнаружения* сигналов на фоне шумов и помех естественного и искусственного происхождения и *режим измерения* тех или иных физических величин.

Режим обнаружения

Обнаружение полезного сигнала на фоне случайных помех является разновидностью однократного измерения по шкале порядка. В метрологических терминах эта задача решается средством измерений, называемым *индикатором*. В локационных системах в измерительную цепь индикатора (см. рис. 1) входят антенна (первичный измерительный преобразователь) и приемник с оптимальным фильтром (промежуточный измерительный преобразователь). В конечном устройстве принимается решение относительно того, есть сигнал, или нет. В простейшем случае такое решение может приниматься оператором. Типовая структурная схема индикатора, входящего в локационную систему с импульсным методом измерения дальности, показана на рис. 81.

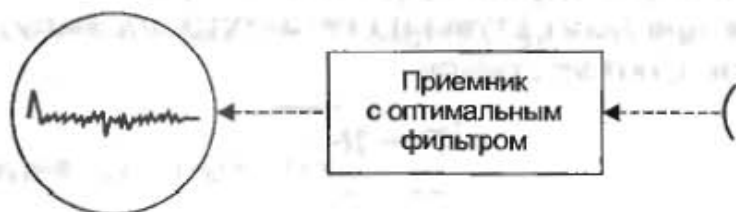


Рис. 81. Структурная схема индикатора в составе локационной системы

Работа оптимального фильтра в составе индикатора описана в части I (п. 5.1). Структурная схема его синтезирована в п. 2.6. Установкой оптимального *порога обнаружения* обеспечивается выполнение требований к качеству принимаемых решений (вероятностям ошибок I и II рода). Поскольку решения представляют собой результаты измерений по шкале порядка, постольку порог обнаружения является важнейшей метрологической характеристикой индикатора, которая должна нормироваться и контролироваться при метрологическом обслуживании локационных систем, включающем испытания и периодическую поверку или калибровку индикаторов.

Второй важнейшей характеристикой индикаторов в составе локационных систем является *дальность обнаружения* объектов (целей). Она зависит от многих факторов и не является постоянной величиной. Тем не менее для сравни-

тельной оценки локационных систем их дальность действия рассчитывается при упрощающих предположениях на основании простых энергетических соображений. В качестве примера рассмотрим расчет дальности действия РЛС в свободном пространстве, т. е. в однородной, непоглощающей радиоволны среде, в которой отсутствуют посторонние объекты (без учета влияния Земли).

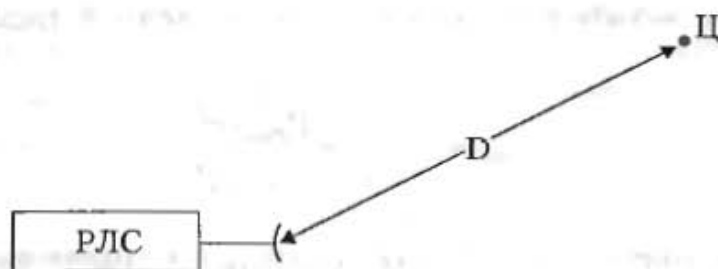


Рис. 82. К выводу выражения для дальности действия РЛС

При ненаправленном излучении приемно-передающей антенны РЛС и отсутствии потерь энергии в процессе распространения радиоволны плотность потока энергии (мощности) в точке расположения цели Ц (рис. 82) должна была бы быть

$$\Pi_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{пер}}}{4\pi D^2},$$

где $P_{\text{пер}}$ — мощность передатчика. Но вследствие направленных свойств антенны она будет

$$\Pi_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{пер}}}{4\pi D^2} G,$$

где G — коэффициент направленного действия антенны в направлении на точку Ц. Если бы в точке Ц находилась приемная антенна с действующей площадью раскрытия S для данного направления, то на вход приемника поступала бы мощность

$$P_{\text{пр}} = \Pi_{\text{ц}} S = \frac{P_{\text{пер}} GS}{4\pi D^2}.$$

Это выражение называется *уравнением радиосвязи* в свободном пространстве. Здесь важно обратить внимание на то, что мощность, поступающая в приемник, обратно пропорциональна квадрату расстояния между приемником и передатчиком.

В радиолокации в точке Ц находится не приемная антенна, а цель. Ее отражающие свойства принято характеризовать некоторой эффективной площадью рассеяния (ЭПР), т. е. такой условной площадью σ , которая, будучи расположена нормально к лучу РЛС и переизлучая равномерно без потерь во все стороны падающую мощность, создает у РЛС такую же плотность потока мощности, как и реальная цель. Ввиду того, что ЭПР цели существенно зависит от ракурса, под которым она облучается, во всех справочниках приводятся средние значения $\bar{\sigma}$ различных целей, полученные экспериментально при облучении этих целей с произвольного направления.

С учетом сказанного, мощность, улавливаемая и переизлучаемая целью, будет определяться выражением:

$$P_{\text{отр}} = \bar{\sigma} \Pi_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{пер}} G \bar{\sigma}}{4\pi D^2}.$$

Плотность потока мощности, отраженной от цели и падающей на антенну РЛС,

$$\Pi_{\text{РЛС}} = \frac{P_{\text{отр}}}{4\pi D^2} = \frac{P_{\text{пер}} G \bar{\sigma}}{16\pi^2 D^4}.$$

Мощность отраженного сигнала, поступающая в приемник,

$$P_{\text{пр}} = \Pi_{\text{РЛС}} S_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G \bar{\sigma}}{16\pi^2 D^4} S_{\text{пр}},$$

где $S_{\text{пр}}$ — действующая площадь раскрыва антенны РЛС для данного направления. Эта величина связана с коэффициентом направленного действия антенны РЛС соотношением:

$$S_{\text{пр}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G,$$

поэтому

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 D^4} \bar{\sigma}.$$

Мощность, поступающая в приемник РЛС, обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до цели.

Дальность до цели будет максимальной, когда приемник работает на пределе своей чувствительности $P_{\text{пр min}}$. Отсюда

$$D_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пер}} G^2 \lambda^2 \bar{\sigma}}{P_{\text{пр min}} (4\pi)^3}}.$$

Это основное уравнение радиолокации при совмещенных приемной и передающей антеннах. При его выводе не оговаривалось, является $P_{\text{пер}}$ импульсной мощностью или средней. Поэтому уравнение справедливо как для импульсного, так и для непрерывного режимов работы РЛС. Соответственно, в качестве $P_{\text{пер}}$ в нем используются импульсная или средняя мощности передатчика.

Основной вывод, который можно сделать, анализируя полученное выражение, состоит в том, что увеличение дальности действия D_{max} сопряжено с большими трудностями, так как все технические характеристики РЛС входят под знак радикала четвертой степени.

Например, для увеличения D_{max} в 2 раза мощность передатчика нужно увеличить в 16 раз. Это сопряжено с использованием высоковольтной техники и возможно только в больших стационарных РЛС, где требования к массогабаритным характеристикам передающих устройств отступают на второй план.

Не менее сложно повысить чувствительность приемника РЛС, т. е. уменьшить $P_{\text{пр min}}$. Эта величина определяется мощностью собственных шумов приемного устройства $P_{\text{ш}}$ и коэффициентом различимости m_p , который показывает, во сколько раз мощность принимаемого сигнала должна быть больше мощности собственных шумов приемника для обеспечения нормальной работы: $P_{\text{пр min}} = m_p P_{\text{ш}}$. Уменьшение коэффициента различимости m_p достигается совершенствованием выходных устройств и применением статистических методов обработки принимаемых сигналов. Мощность собственных шумов приемного устройства $P_{\text{ш}}$ определяется уравнением Найквиста:

$$P_{\text{ш}} = 4kNT \cdot \Delta f,$$

где k — постоянная Больцмана; N — коэффициент шума приемника; T — абсолютная температура приемника; Δf — ширина полосы пропускания, так что самым прямым путем уменьшения $P_{\text{ш}}$ является понижение температуры T . С этой целью в больших стационарных РЛС приемные устройства помещаются в термостаты и охлаждаются до температуры жидкого гелия (-270 °С). Однако в компактных и мобильных РЛС, устанавливаемых на подвижных носителях, криогенная техника не применяется. Последней возможностью уменьшения $P_{\text{ш}}$ является уменьшение ширины полосы пропускания приемника Δf . Если при работе импульсным методом Δf согласована с длительностью импульса $\tau_{\text{и}}$ (см. рис. 32), то $\Delta f \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}}$, и при уменьшения Δf нужно увеличивать $\tau_{\text{и}}$. При радиолокации Луны, например, для увеличения дальности действия РЛС длительность зондирующих импульсов была увеличена до десятых долей секунды.

Из основного уравнения радиолокации также следует, что для увеличения D_{max} нужно увеличивать коэффициент направленного действия антенны G , т. е. уменьшать ширину диаграммы направленности антенны. Но чем уже диаграмма направленности антенны, тем меньше отраженных от цели импульсов приходит к РЛС при постоянной скорости обзора пространства. Это ограничивает возможность увеличения G .

Наконец из основного уравнения радиолокации вытекает, что увеличение D_{max} возможно за счет увеличения длины волны λ . Однако увеличение λ при сохранении $G = \text{const}$ возможно только при значительном увеличении размеров антенны $S_{\text{пр}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$, что ставит очевидные ограничения на этом пути, особенно в авиации, ракетной и космической технике. Если же размеры антенны заданы и $S_{\text{пр}} = \text{const}$, то

$$D_{\text{max}} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр min}}} \frac{S_{\text{пр}}^2}{4\pi \lambda^2} \bar{\sigma}}$$

и оказывается, что для увеличения D_{max} длину волны λ нужно не увеличивать, а уменьшать.

В реальных условиях, а не в свободном пространстве дальность действия РЛС зависит от множества факторов, таких как кривизна Земли, отражение от

подстилающей поверхности, рефракция и затухание радиоволн в атмосфере, флюктуация ЭПР цели и многих других. В результате D_{\max} оказывается случайной величиной, характеризующейся значительной неопределенностью. На практике чаще всего пользуются оценками числовых характеристик законов распределения вероятности D_{\max} , полученными экспериментально.

Режим измерения

В режиме измерения координат и радиальной (относительной) скорости цели основной интерес представляет обычный метеорологический анализ источников и составляющих неопределенности результатов измерений. В качестве примера рассмотрим измерение дальности импульсным методом.

Из анализа уравнения измерения дальности импульсным радиолокационным дальномером (21) следует, что неопределенность результата измерения расстояния до цели u_D возникает из-за неопределенности скорости распространения радиоволн u_c и неопределенности времени задержки u_{t_3} :

$$u_D = \sqrt{\left(\frac{t_3}{2} u_c\right)^2 + \left(\frac{c}{2} u_{t_3}\right)^2}.$$

Представление о неопределенности скорости распространения радиоволн можно получить из данных, приведенных в табл. 7.

Таблица 7. Скорость распространения радиоволн в различных условиях

Условия распространения	c , км/с	Примечание
В пустоте	299 776 ± 4 299 773 ± 10	По данным измерений 1941 г. По данным измерений 1944 г.
Средние волны: – над соленой и пресной водой – над сушей	299 000 + 299 500 295 000	Приведены крайние значения Приведено среднее значение
Радиоволны метрового диапазона над морем	299 687 ± 5	Измерения проводились импульсной навигационной системой
Радиоволны сантиметрового диапазона ($\lambda = 10$ см) на трассе «земля—самолет».		Измерения проводились импульсной навигационной системой.
Высота полета самолета: – 3,3 км – 6,5 км – 9,8 км	299 713 299 733 299 750	Приведены средние значения

Неопределенность времени задержки t_3 обусловлена многими обстоятельствами.

Во-первых, зондирующий импульс, просачивающийся в приемник через антенный переключатель (см. рис 76) и появляющийся в начале развертки на экране электронно-лучевой трубки, опережает импульс, отраженный от цели

и поступающий на ту же электронно-лучевую трубку, не на время t_3 , а на время $t_3 + 2t_{в.т.}$, где $2t_{в.т.}$ — время прохождения импульсным сигналом волноводного тракта от антенного переключателя до антенны и в обратном направлении. В результате отсчитываемая дальность оказывается больше истинной, если в результат измерения не вносится поправка, точное значение которой должно равняться $-2ct_{в.т.}$

Во-вторых, отсчетное устройство дальномера, как правило, имеет равномерную шкалу и постоянный масштаб по всей длине шкалы, что делает удобным отсчет дальности до цели. Напряжение развертки, подаваемое на горизонтальные отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки, должно при этом меняться строго по *линейному* закону. Однако на практике генератор напряжения развертки вырабатывает напряжение, только близкое к линейному. В результате скорость развертки оказывается не строго постоянной, а масштаб неодинаковым вдоль шкалы. Это вносит неопределенность в результат измерения дальности.

В качестве примера на рис. 83 показаны графики линейного и *нелинейного* изменения напряжения развертки. Кривая на рис. 83 во всех точках, кроме начальной и конечной, проходит выше прямой. Следовательно, все точки развертки удалены от ее начала больше, чем соответствующие им отметки шкалы, и все значения t_3 и D завышены.

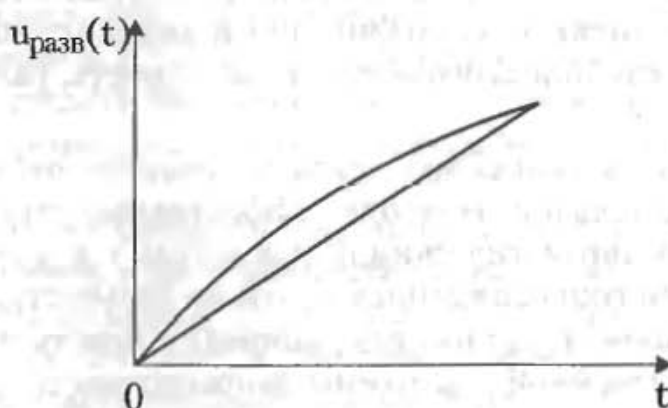


Рис. 83. Напряжения развертки

Основным способом уменьшения рассматриваемой неопределенности является применение специальных высокостабильных схем линейной развертки.

В-третьих, изменение параметров схемы отсчетного устройства, а также нестабильность источников питания приводят к изменению *амплитуды напряжения развертки*. Из-за этого скорость развертки меняется, изменяется ее масштаб, что при одной и той же шкале приводит к неправильному определению t_3 и D .

В-четвертых, масштаб развертки зависит не только от амплитуды развертываемого напряжения, но и от *чувствительности электронно-лучевой трубки* к отклонению луча. Последняя, в свою очередь, зависит от напряжения на втором аноде. Следовательно, нестабильность источников питания является причиной появления еще одной составляющей неопределенности t_3 и D .

Наконец, нужно отметить неопределенность, возникающую из-за *неточности отсчета*. Причинами этой неопределенности являются:

- неточность интерполяции на глаз, когда начало отраженного импульса находится между соседними рисками механической или электронной шкалы; эта неточность возрастает в случае неравномерности развертки;
- неточность из-за параллакса при отсчете дальности по механической шкале;
- неточность, обусловленная размерами светящегося пятна даже при хорошей фокусировке луча электронно-лучевой трубки;
- неточность из-за шумов, размывающих линию развертки, что эквивалентно увеличению ее толщины и запаздыванию переднего фронта отраженного сигнала, если этот фронт наклонный;
- неточность, вызванная нестабильностью синхронизации отсчетного устройства и передатчика. Если эта синхронизация нестабильна, то каждая последующая развертка неточно накладывается на предыдущую и контуры изображения на экране электронно-лучевой трубки размываются;
- неточность, связанная с инерционностью оператора. Она особенно проявляется при измерении дальности до быстро перемещающейся цели, так как оператору свойственна некоторая инерционность («постоянная времени» оператора порядка 1 с) и он не может мгновенно реагировать на изменение положения отраженного сигнала на линии развертки. Эта составляющая неопределенности зависит от квалификации и индивидуальных особенностей оператора, таких как внимательность, утомляемость, разрешающая способность глаз и др.

Неопределенность, возникающая из-за неточности отсчета, является, как правило, самой значительной. Наиболее эффективным способом ее преодоления служит переход к автоматическим дальномерам, т. е. к локационным системам с автоматическим сопровождением целей по дальности.

При измерении *направления* на цель неопределенность пеленга определяется главным образом шириной диаграммы направленности антенны. В локационных системах наибольшее распространение получили апертурные антенны, диаграмма направленности которых аппроксимируется функцией $\frac{\sin x}{x}$. В п. 2.8.1 приведены примеры оценки неопределенности пеленгования такими антеннами в пассивном режиме по максимуму принимаемого сигнала и равносигнальным методом. Аналогично выполняется метрологический анализ неопределенности пеленгования в активном режиме.

Уравнение измерения радиальной (относительной) скорости цели локационными системами

$$v = c \frac{F_d}{2f}$$

принципиально не отличается от уравнения (21). Поэтому метрологический анализ неопределенности измерения скорости цели v идентичен анализу неопределенности измерения дальности до цели D и сводится в основном к анализу схмотехнических решений.

Глава 3

Метрологическое обслуживание средств измерений

3.1. Область применения средств измерений

Где бы ни применялись средства измерений, во всех без исключения случаях на результаты измерений и их качество оказывают влияние метрологические характеристики этих средств измерений. Поэтому при метрологическом обслуживании средств измерений главное внимание уделяется их метрологическим характеристикам.

Область применения средств измерений делится на две сферы (табл. 8): сферу государственной ответственности за качество и единство измерений (в официальных нормативных документах она называется *сферой государственного регулирования обеспечения единства измерений* — п. 6.4.1) и сферу ответственности пользователей средств измерений.

Таблица 8

Область применения средств измерений	
Сфера государственной ответственности	Сфера ответственности пользователей
Испытания средств измерений	Калибровка средств измерений
Проверка средств измерений	

Сфера государственной ответственности распространяется на жизненно важные направления и виды деятельности, такие как здравоохранение, охрана окружающей среды, безопасность и т. п. Перечень их, утвержденный законодательно, приведен в п. 6.4.1.

В сфере государственной ответственности все средства измерений подразделяются на *типы*. Под типом средств измерений понимается совокупность средств измерений, предназначенных для измерений одних и тех же величин, выраженных в одних и тех же единицах, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же документации. Тип средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежит *обязательному* утверждению Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандартом — см. п. 6.3.2) с целью обеспечения единства измерений в стране и постановки на производство и выпуска в обращение средств измерений, соответствующих требованиям, установленным в нормативных документах. При утверждении типа средств измерений устанавливаются показатели точности, интервал между поверками средств измерений, а также методика поверки данного типа средств измерений.

Метрологическое обслуживание средств измерений в сфере государственной ответственности является *обязательным*. Видами метрологического обслуживания средств измерений в этой сфере являются:

- *испытания* средств измерений в целях утверждения типа;
- *поверка* средств измерений.

Принадлежность метрологически исправного средства измерений к тому или иному типу гарантирует, что его метрологические характеристики находятся в установленных пределах. Метрологическая исправность проверяется при поверках средств измерений.

Сфера ответственности пользователей распространяется на средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Метрологическое обслуживание средств измерений в сфере ответственности пользователей является *добровольным*. Оно состоит в *калибровке* средств измерений (см. п. 3.3), выполняемой в добровольном порядке.

Поскольку в сфере ответственности пользователей отсутствует такой вид метрологического обслуживания средств измерений, как испытания, постольку в этой сфере нет подразделения средств измерений на типы. В случае перевода средства измерений из сферы ответственности пользователей в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений такое средство измерений должно пройти испытания в целях утверждения типа.

3.2. Испытания средств измерений

Испытания средств измерений в целях утверждения типа являются одной из форм государственного регулирования в области обеспечения единства измерений (см. п. 6.3.2). Предусмотрено два вида испытаний, показанных на рис. 84.

Под *серийным производством* средств измерений конкретного типа понимается их постоянное (непрерывное) производство или производство периодически повторяющимися партиями. *Единичным* производством считается

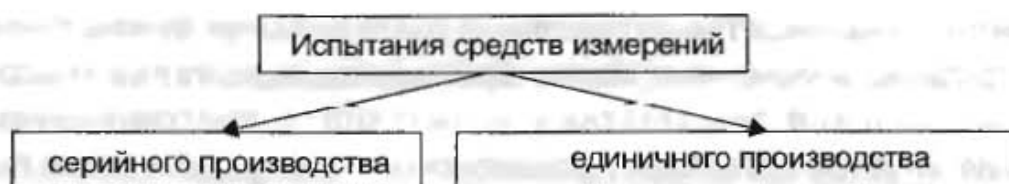


Рис. 84. Виды испытаний средств измерений

однократное производство средства измерений конкретного типа (в одном или нескольких экземплярах), повторное изготовление которого не предусмотрено.

Под испытаниями средств измерений в целях утверждения типа понимаются работы по определению метрологических и технических характеристик однотипных средств измерений. Испытания средств измерений в целях утверждения типа проводятся на основании заявки заинтересованного лица — Заявителя.

Заявителем испытаний средств измерений *серийного производства* могут быть юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие их выпуск из производства, или уполномоченные ими другие юридические лица и индивидуальные предприниматели.

Заявителем испытаний средств измерений *единичного производства* могут быть юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие:

- разработку средств измерений;
- выпуск средств измерений из производства;
- ввоз на территорию Российской Федерации и продажу на территории Российской Федерации средств измерений;
- использование средств измерений.

Испытания средств измерений в целях утверждения типа проводятся юридическими лицами, аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений на выполнение испытаний средств измерений, если их области аккредитации включают испытания заявляемых средств измерений. Сведения о содержании областей аккредитации юридических лиц, аккредитованных на право выполнения испытаний средств измерений в целях утверждения типа, Заявитель может получить от федерального органа исполнительной власти, осуществляющего аккредитацию в области обеспечения единства измерений, или из государственного реестра аккредитованных организаций, осуществляющих деятельность по оценке соответствия продукции, производственных процессов и услуг установленным требованиям качества и безопасности, а также деятельность по обеспечению единства измерений.

Испытания средств измерений в целях утверждения типа оплачиваются Заявителем в соответствии с условиями заключенных договоров (контрактов) с Испытателем.

Решение об утверждении типа средств измерений принимает Росстандарт на основании положительных результатов испытаний средств измерений в целях утверждения типа. Основанием для рассмотрения вопроса об утверждении типа средства измерений является поступление в Росстандарт заявки Заявителя

на утверждение типа средства измерений с приложением копии заявки на проведение испытаний с приложениями, программы испытаний и акта испытаний с положительными результатами испытаний и приложениями. Росстандарт в течение 30 дней организует рассмотрение материалов испытаний на соответствие требованиям законодательства Российской Федерации по обеспечению единства измерений, а также по выполнению обязательных метрологических и технических требований (характеристик) к средству измерений (при их наличии). По результатам рассмотрения поступивших документов при положительных результатах испытаний Росстандарт издает приказ об утверждении типа средства измерений. При несоответствии материалов испытаний общим требованиям законодательства Российской Федерации по обеспечению единства измерений или обязательным метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) к средству измерений Росстандарт возвращает поступившие документы Заявителю с указанием причин.

Решение об утверждении типа стандартного образца или типа средства измерений размещается на интернет-сайте Росстандарта.

Росстандарт организует хранение поступивших копий заявок на проведение испытаний с приложениями, программы испытаний и акта испытаний с положительными результатами испытаний и приложениями, а также направление в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений сведений об утвержденных типах средств измерений.

На каждый экземпляр средств измерений утвержденного типа и на сопроводительные документы к ним наносится знак утверждения типа. Конструкция средств измерений должна обеспечивать возможность нанесения этого знака на видном месте. Если особенности конструкции не позволяют нанести знак утверждения типа непосредственно на средство измерений, он наносится на сопроводительные документы.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие разработку, выпуск из производства, ввоз на территорию Российской Федерации, продажу и использование на территории Российской Федерации средств измерений, не предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (см. п. 6.4.1), могут в *добровольном* порядке представлять их на испытания и утверждение типа.

3.3. Калибровка средств измерений

В сфере ответственности пользователей нет такого вида метрологического обслуживания средств измерений как испытания, при которых определяются их метрологические характеристики. Но пользователи не могут нести ответственности за качество и единство измерений, если не знают метрологических характеристик своих средств измерений или не уверены в том, что они сохраняют свои значения. Поэтому в сфере ответственности пользователей предусмотрен такой вид метрологического обслуживания средств измерений, как *калибровка*, которая является *добровольной*.

Под калибровкой средств измерений понимается совокупность операций, выполняемых в целях определения значений метрологических характеристик средств измерений.

Для определения метрологических характеристик 1-го вида (см. п. 1.2) используются средства измерений, хранящие информацию о размере единицы измерения с заведомо более высокой точностью. Они называются рабочими эталонами. В зависимости от того, какие используются рабочие эталоны и какие калибруются средства измерений, различают следующие варианты калибровки:

Вариант	Рабочий эталон	Калибруемое средство измерений
I	Измерительный прибор	Измерительный прибор
II	Мера	Измерительный прибор
III	Измерительный прибор	Мера
IV	Мера	Мера
V	Измерительный прибор	Измерительный преобразователь
VI	Мера	Измерительный преобразователь
VII	Измерительный преобразователь	Измерительный преобразователь

Пример 29

При калибровке амперметра класса точности 1,0 по первому варианту используется амперметр класса точности 0,2, выступающий в качестве рабочего эталона. Электрическая схема соединений приведена на рис. 85, а. Показания калибруемого амперметра в контрольных точках шкалы сравниваются с показаниями эталона, в результате чего определяются поправки к показаниям калибруемого прибора с их расширенными неопределенностями. Обобщенная схема калибровки амперметров в диапазоне $10^{-2} \div 30$ А приведена на рис. 85, б.

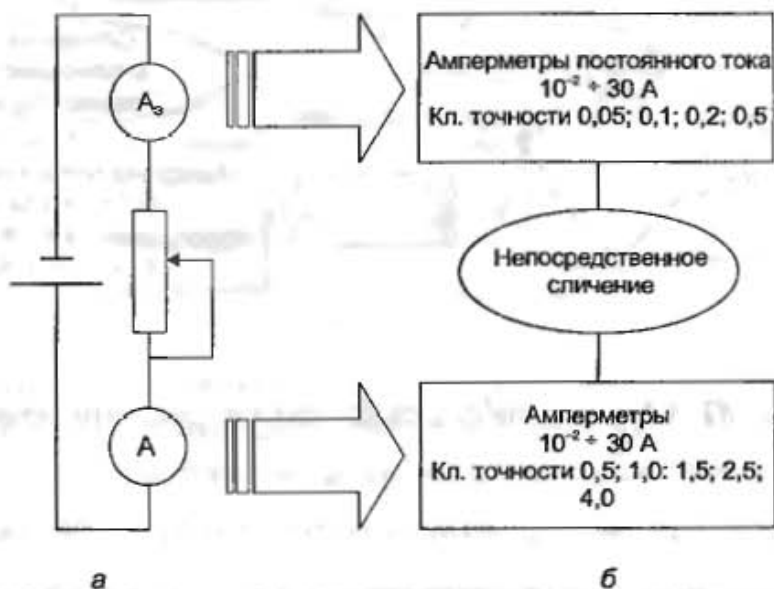


Рис. 85. Схема калибровки амперметров постоянного тока

При калибровке по четвертому варианту могут сравниваться результаты измерений, полученных с помощью эталонной и калибруемой мер, как это показано, например, на рис. 86, или калибруемая мера может сличаться с эталонной непосредственно без вспомогательных измерений (отрезки длины на рис. 86 тогда не нужны). В обоих случаях схема калибровки выглядит так, как это показано на рис. 86. Если непосредственное сличение калибруемой меры с эталонной невозможно, то может применяться сличение с помощью компаратора — специального технического устройства, применяемого для сравнения мер.

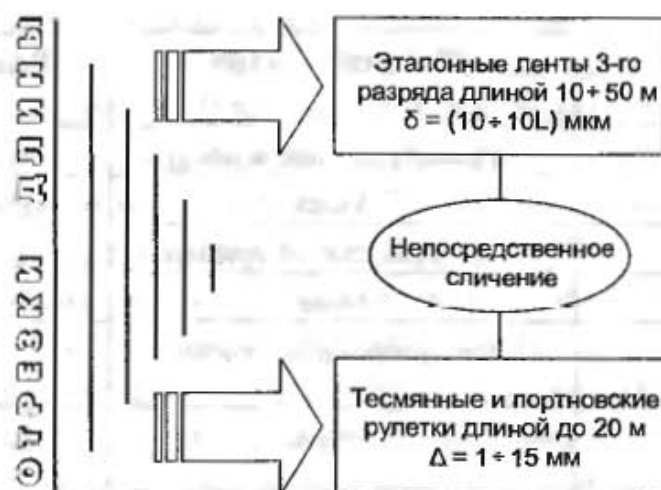


Рис. 86. Схема калибровки штриховых мер длины

Пример 30

Методика калибровки магазинов сопротивления в диапазоне $10^{-3} \div 10^8$ Ом предусматривает использование в качестве компаратора моста переменного тока. Электрическая схема соединений показана на рис. 87, а.

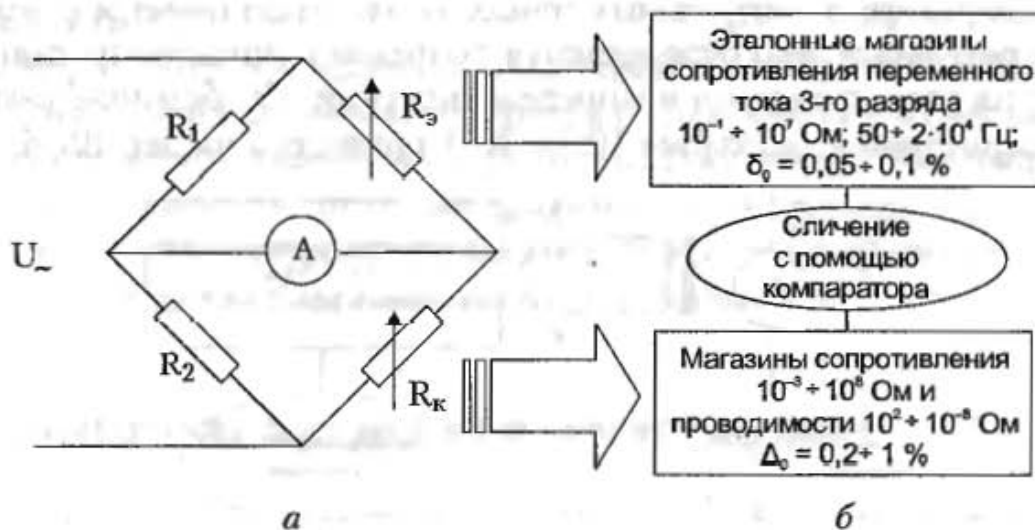


Рис. 87. Схема калибровки магазинов сопротивления

Условие равновесия моста записывается следующим образом: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_k}$.

При помощи отсчетного устройства калибруемого магазина сопротивления выбираются отдельные точки в диапазоне измерений. В этих точках путем

подбора эталонного сопротивления R_3 по показаниям амперметра добиваются равновесия моста. При равенстве нулю тока, протекающего через амперметр, сопротивление калибруемого магазина $R_k = R_3 \frac{R_2}{R_1}$, где $\frac{R_2}{R_1}$ — масштабный коэффициент. Это значение с соответствующей расширенной неопределенностью приписывается сопротивлению калибруемого магазина в выбранной точке диапазона измерений. Обобщенная схема калибровки магазинов сопротивления в диапазоне $10^{-3} \div 10^8$ Ом показана на рис. 87, б.

Калибровка по второму варианту иллюстрируется схемой, представленной на рис. 88.

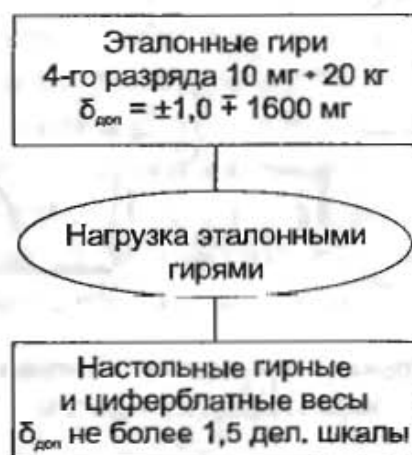


Рис. 88. Схема калибровки весов

Третий вариант калибровки отличается от этого тем, что весы имеют большую точность, чем номинальные значения гирь. Тогда они используются в качестве эталонного прибора и на рис. 88 меняются с гирями местами.

Калибровка измерительных преобразователей сводится к построению их градуировочных характеристик. Этот вопрос подробно рассмотрен в части I, п. 4.4.

Во всех случаях схема калибровки имеет вид, показанный на рис. 89.

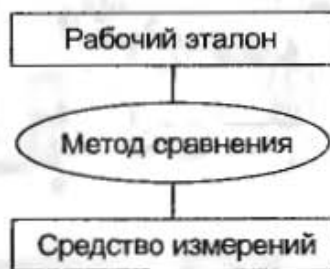


Рис. 89. Обобщенная схема калибровки

При определении динамических характеристик используются рабочие эталоны, воспроизводящие единицы измерений в особых условиях, которые заключаются в том, что измеряемые величины меняются во времени.

Пример 31

Для определения *переходной характеристики* настольных циферблатных весов в качестве рабочего эталона используется устройство, воспроизводящее

процесс, называемый *единичной ступенью*. С помощью этого устройства весы резко нагружаются эталонной гирей 4-го разряда с номинальным значением массы 1 кг. Отклик весов на нагрузку в виде единичной ступени (переходная характеристика измерительного прибора) регистрируется самописцем. Схема измерительного эксперимента приведена на рис. 90.

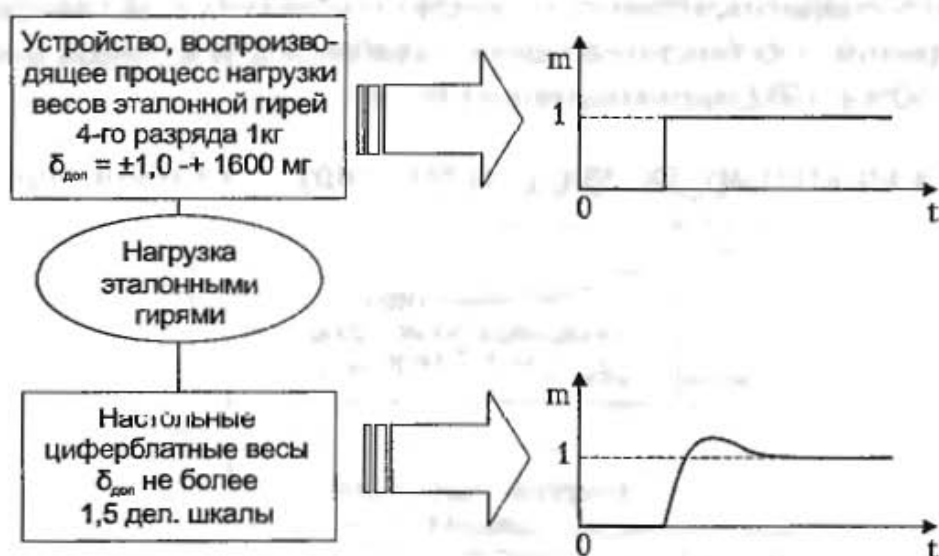


Рис. 90. Схема измерительного эксперимента при определении переходной характеристики весов

При определении динамических характеристик процессы, воздействующие на средства измерений, называются *испытательными сигналами*. Рассмотрим пример использования в качестве испытательного сигнала короткого прямоугольного импульса.

Пример 32

Для определения *импульсной характеристики* осциллографа используется генератор прямоугольных импульсов большой амплитуды и малой длительности.

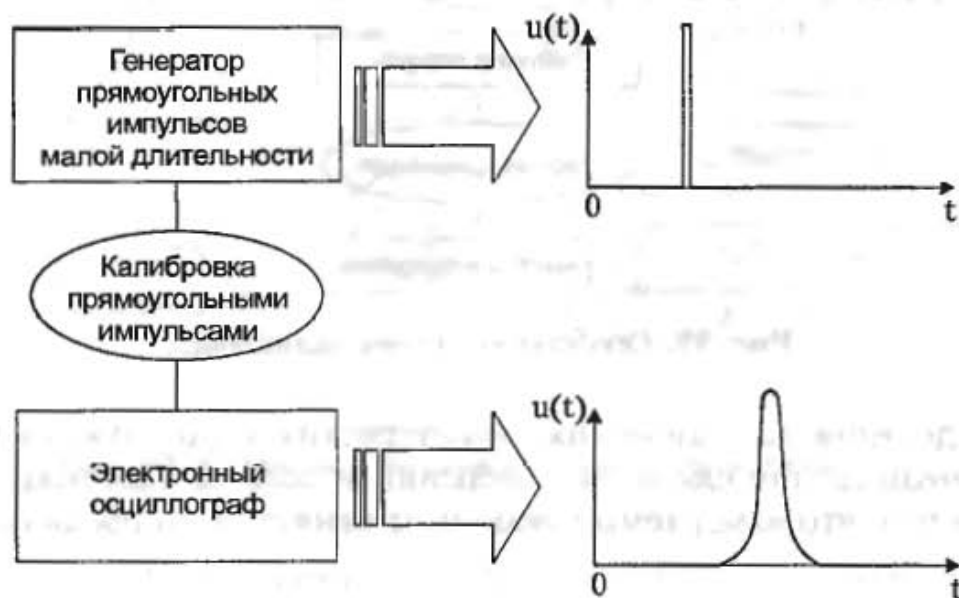


Рис. 91. Схема измерительного эксперимента при определении импульсной характеристики осциллографа

сти. Отклик осциллографа на этот испытательный сигнал (импульсная характеристика средства измерений) регистрируется на экране электронно-лучевой трубки. Схема измерительного эксперимента показана на рис. 91.

Испытательные сигналы (входные процессы) в примерах 31 и 32 являются аналогами однозначных эталонных мер. Применение аналога многозначной эталонной меры для определения динамической характеристики средства измерений рассмотрим на следующем примере.

Пример 33

Для определения амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик средств измерений используется прибор, называемый «Измеритель АЧХ и ФЧХ». Он состоит из встроенного генератора переменного напряжения с фиксированными значениями частот и спектроанализатора. Испытательные сигналы в виде переменного напряжения с одинаковыми амплитудами, но разными частотами подаются на вход измерительного прибора, а их амплитуды и фазы на выходе регистрируются спектроанализатором. Схема измерительного эксперимента приведена на рис. 92.

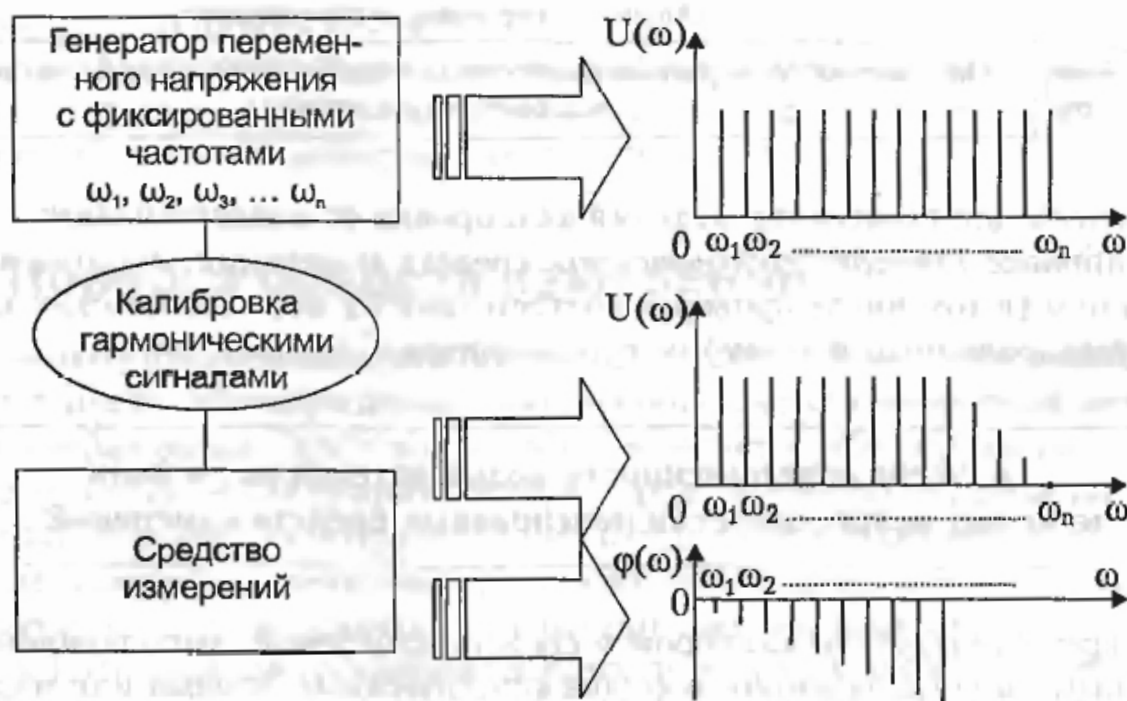


Рис. 92. Схема измерительного эксперимента при определении АЧХ и ФЧХ средства измерений

Определение метрологических характеристик 2-го вида (см. п. 1:2) в необходимых случаях носит характер научного исследования. Обычно для этого используются *методики испытаний* средств измерений и *испытательное оборудование*.

Для сравнения в дальнейшем калибровки и поверки средств измерений в табл. 9 приведены последовательность и содержание некоторых процедур при калибровке средств измерений.

Таблица 9. Последовательность и содержание процедур при калибровке средств измерений

Процедуры	Средства измерений			
	Мера (М)	Измерительный преобразователь (ИП)	Измерительный прибор (П)	Градуируемое при калибровке средство измерений (СИ)
Измерительный эксперимент	Измерение М методом сравнения с эталонной мерой	Градуировка измерительного преобразователя с помощью эталонов	Сравнение показаний прибора с показаниями эталона	Определение градуировочной характеристики СИ с помощью эталонных средств
Результаты измерительного эксперимента	Измеренное значение М с расширенной неопределенностью	Градуировочная характеристика ИП с расширенными неопределенностями ее значений в выбранных точках	Значения поправок к показаниям П с их расширенными неопределенностями	Градуировочная характеристика СИ с расширенными неопределенностями ее значений в выбранных точках
Оформление результатов	Оформление <i>сертификата калибровки</i> , не являющегося документом, подтверждающим соответствие			
	Оценка соответствия не производится			

Ключевым для понимания отличия калибровки от поверки является то, что при калибровке *проверка соответствия* средств измерений метрологическим требованиям (в том числе проверка соответствия их метрологических характеристик установленным нормам) *не производится*. Следовательно,

в сфере ответственности пользователей нет и быть не может метрологически неисправных средств измерений¹.

В то же время результаты калибровки средств измерений, выполненной аккредитованными в установленном порядке юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями, могут быть использованы для проверки соответствия при поверке.

Из того, что при калибровке проверка соответствия средств измерений метрологическим требованиям не производится, следует, что их метрологические характеристики не нормируются, хотя для обеспечения единства измерений их значения нужно знать.

¹ Это является предметом ответственности пользователей. Если метрологические характеристики средства измерений определены неправильно или изменились в процессе эксплуатации, то такое средство измерений является, конечно, непригодным для применения. Но подлежит оно не ремонту, а калибровке.

Скрытого метрологического отказа у средств измерений, метрологические характеристики которых не нормированы, быть не может.

Поэтому говорить о межкалибровочном интервале как аналоге межповерочного интервала нельзя. В форме *сертификата о калибровке* средства измерений графа о сроке его действия вообще отсутствует. В то же время в калибровочной лаборатории могут накопиться сведения о долговременной стабильности или нестабильности метрологических характеристик конкретного средства измерений. В результате их анализа пользователю средства измерений может быть *рекомендован* срок следующей калибровки (межкалибровочный интервал), но никакой юридической ответственности за соблюдение этого срока и поведение средства измерений в течение этого срока ни пользователь, ни калибровочная лаборатория не несут. Рекомендуемый межкалибровочный интервал в сертификате о калибровке может быть записан только на основании письменной заявки Заказчика (пользователя СИ).

Используемые при калибровке рабочие эталоны должны удовлетворять свойству *прослеживаемости* (см. п. 4.3) к государственным первичным эталонам соответствующих единиц, а при отсутствии последних — к национальным эталонам единиц других государств.

Выполняющие калибровку средств измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели в *добровольном* порядке могут быть аккредитованы в области обеспечения единства измерений.

3.4. Поверка средств измерений

Под поверкой средств измерений понимается совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям. Эта совокупность включает в себя множество операций, начиная от составления графика поверки средств измерений, представления их на поверку, внешнего осмотра и т. д., вплоть до оформления результатов поверки в виде протокола, клеймения средств измерений и занесения сведений о поверке в техническую документацию (паспорт средства измерений, свидетельство о поверке). Но *главным содержанием поверки является проверка соответствия нормированных метрологических характеристик средств измерений нормам*, приведенным в технической документации.

По способу выполнения поверки делятся на два вида (рис. 93).



Рис. 93. Виды поверки средств измерений

При поверке с использованием результатов калибровки остается проверить соответствие метрологических характеристик нормам, так как сами метрологические характеристики уже определены при калибровке. Это чисто юридическая процедура, которая может выполняться только специально на то уполномоченными лицами — *поверителями*. Поверители, как и нотариусы, действуют от имени государства и несут ответственность перед государством за принимаемые ими решения. Поэтому немаловажно, кем проводилась калибровка. Если калибровка входила в процедуру поверки и выполнялась самим поверителем, то вся ответственность за результаты поверки ложится на него. Если же калибровка выполнялась как самостоятельная процедура другими лицами и в других лабораториях, то перед поверителем встает вопрос о доверии результатам

Таблица 10. Последовательность и содержание процедур при поверке средств измерений

Процедуры	Средства измерений			
	Мера (М)	Измерительный преобразователь (ИП)	Измерительный прибор (И)	Градуйруемое при поверке средство измерений (СИ)
Измерительный эксперимент	Измерение М методом сравнения с эталонной мерой	Градуйровка измерительного преобразователя с помощью эталонов	Сравнение показаний прибора с показаниями эталона	Определение градуировочной характеристики СИ с помощью эталонных средств
↓ Результаты измерительного эксперимента	Погрешность М (разность между измеренным и номинальным значениями), измеренная с расширенной неопределенностью U	Погрешность ИП (разность между измеренными и номинальными значениями функции преобразования ИП), измеренная с расширенной неопределенностью U	Погрешность И (разность показаний И и эталона), измеренная с расширенной неопределенностью U	Градуйровочная характеристика СИ с расширенными неопределенностями ее значений в контрольных точках
↓ Оценка соответствия	Погрешность СИ с учетом U не выходит за установленные пределы допускаемой погрешности	Нестабильность СИ за межповерочный интервал (разности значений предыдущей и настоящей градуировочных характеристик) не выходит за установленные пределы с учетом неопределенности обеих градуировок		
↓ Оформление результатов	Подтверждение соответствия путем оформления <i>свидетельства о поверке</i> , подтверждающего прогнозируемое на межповерочный интервал соответствие СИ требованиям по пределам погрешностей (по нестабильности градуировочной характеристики для градуируемых СИ)			

калибровки. Результаты калибровки признаются поверителями только в том случае, если она выполнена юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями, аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений.

При поверке без использования результатов калибровки поверитель экспериментально проверяет, не выходит ли нормированная метрологическая характеристика за установленные для нее пределы.

В табл. 10 в качестве иллюстрации приведены последовательность и содержание основных процедур при поверке средств измерений. Сравнение табл. 10 с табл. 9 позволяет получить наглядное представление о различии между поверкой и калибровкой.

Как и при калибровке, главной процедурой при поверке является измерительный эксперимент, цель которого может состоять, например, в сравнении результатов измерения физической величины в контрольных точках диапазона измерений поверяемым прибором и рабочим эталоном — рис. 94.

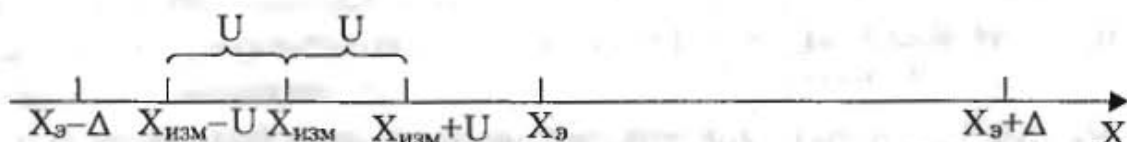


Рис. 94. К выводу критерия соответствия при поверке

На основании сравнения определяется разность между показаниями измерительного прибора $X_{\text{изм}}$ и рабочего эталона $X_{\text{э}}$. Суммарная неопределенность этой разности

$$u_{\Sigma} = \sqrt{u_{X_{\text{изм}}}^2 + u_{X_{\text{э}}}^2},$$

где $u_{X_{\text{изм}}}$ и $u_{X_{\text{э}}}$ — суммарные неопределенности показаний поверяемого средства измерений и рабочего эталона соответственно. Обычно, $u_{X_{\text{э}}} \leq \frac{1}{3} u_{\Sigma}$, так что вто-

рым слагаемым под радикалом можно пренебречь (см. формулу (30) в ч. I, п. 5.2). Тогда наиболее распространенный вариант критерия соответствия при поверке (при симметричных нижнем и верхнем пределах допускаемой погрешности $\Delta_{\text{н}} = \Delta_{\text{в}} = \Delta$ — см. рис. 94) формулируется следующим образом:

$$|X_{\text{э}} - X_{\text{изм}}| \leq \Delta - U,$$

где U — расширенная неопределенность показания поверяемого средства измерений. Если во всех точках диапазона измерений условие критерия соответствия выполняется, то считается, что эта метрологическая характеристика соответствует требованиям (нормам), приведенным в технической документации, и по результатам контроля этой метрологической характеристики средство измерений признается метрологически исправным. Такое средство измерений может быть допущено к применению в сфере государственной ответственности за качество и единство измерений. В противном случае считается, что произошел метрологический отказ, и средство измерений признается метрологически неисправным, непригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Рассмотренный критерий является самым простым и не учитывает важной особенности поверки. Решение о метрологической исправности или неисправности средства измерений может быть правильным или неправильным. Ошибкой I рода считается признание исправного средства измерений неисправным, а ошибкой II рода — признание неисправного средства измерений исправным. Условные вероятности ошибок I и II рода рассчитываются методами *теории статистических решений*. В частности, как показано в ч. I (п. 5.1), при нормальном законе распределения вероятности результата измерения эталонного значения поверяемым средством измерений среднее значение условной вероятности ошибки I рода $\bar{\alpha}$ и максимальное значение условной вероятности ошибки II рода β_{\max} определяются выражениями:

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{\Delta + \delta}{\Delta} L\left(\frac{\Delta + \delta}{\sigma}\right) + \frac{\Delta - \delta}{\Delta} L\left(\frac{\Delta - \delta}{\sigma}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma}{\Delta} \left[e^{-\frac{(\Delta - \delta)^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(\Delta + \delta)^2}{2\sigma^2}} \right];$$

$$\beta_{\max} = L\left(\frac{\Delta + \delta}{\sigma}\right) - L\left(\frac{\Delta - \delta}{\sigma}\right),$$

где σ — среднее квадратическое отклонение результата измерения, а δ — пороговое отклонение результата измерения от эталонного значения, на основании сравнения с которым принимается решение о признании средства измерений метрологически исправным или неисправным. Как видно из этих выражений, при известных Δ и σ показатели качества поверки $\bar{\alpha}$ и β_{\max} целиком и полностью определяются выбором δ . Наглядное представление об этом можно получить из данных, приведенных в табл. 11.

Таблица 11

$P_{\text{довер.}}$	Δ	δ	$\bar{\alpha}$	β_{\max}
0,997	3σ	Δ	0,13	0,50
		$0,75\Delta$	0,29	0,23
		$0,5\Delta$	0,51	0,07
		$0,25\Delta$	0,75	0,01
0,99	$2,6\sigma$	Δ	0,15	0,50
		$0,75\Delta$	0,31	0,26
		$0,5\Delta$	0,52	0,10
		$0,25\Delta$	0,75	0,03
0,95	2σ	Δ	0,20	0,50
		$0,75\Delta$	0,35	0,31
		$0,5\Delta$	0,55	0,16
		$0,25\Delta$	0,78	0,06

$P_{\text{довер.}}$	Δ	δ	$\bar{\alpha}$	β_{max}
0,9	1,65 σ	Δ	0,24	0,50
		0,75 Δ	0,39	0,34
		0,5 Δ	0,59	0,20
		0,25 Δ	0,84	0,09

Часто приходится принимать во внимание и экономические соображения. Ошибки II рода влекут за собой неизмеримо большие материальные потери, чем ошибки I рода. Критерий, учитывающий цену ошибок I и II рода, называется *критерием минимума среднего риска* (см. ч. I, п. 7.1). При синтезе δ по критерию минимума среднего риска материальные потери от *брака поверки*, представляющего собой ошибки I и II рода, в среднем будут минимальными.

Находят применение и другие критерии, рассмотренные в ч. I, п. 7.1.

Говоря о качестве поверки, нельзя не отметить, что калибровка и поверка с использованием результатов калибровки позволяют обеспечить более высокую точность измерений, чем поверка без использования результатов калибровки. Объясняется это тем, что при калибровке и поверке с использованием результатов калибровки определяются индивидуальные метрологические характеристики средств измерений, в то время как при поверке без использования результатов калибровки они остаются неизвестными; устанавливается лишь факт, что нормированные метрологические характеристики находятся в определенных пределах. Такой упрощенный порядок поверки оправдан, например, для торговых весов и гирь, щитовых электроизмерительных приборов и других средств измерений невысокой точности, откалиброванных на заводе-изготовителе, поскольку он существенно облегчает метрологическое обслуживание таких средств измерений. Если же средства измерений применяются для высокоточных измерений, то их поверка должна выполняться с использованием результатов калибровки.

Обязательной поверке подлежат все средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (см. п. 6.4.1). Поверка бывает первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и экспертной.

Первичной поверке подлежат средства измерений утвержденных типов при выпуске их из производства или после ремонта, а также при ввозе по импорту.

Периодической поверке подвергаются средства измерений, находящиеся в эксплуатации или на хранении, через определенные межповерочные интервалы времени.

Внеочередную поверку производят при эксплуатации или хранении средств измерений при:

- повреждении знака поверительного клейма, а также в случае утраты свидетельства о поверке;
- вводе в эксплуатацию средств измерений после длительного хранения (более одного межповерочного интервала);

- проведении повторной юстировки или настройки, известном или предполагаемом ударном воздействии на средство измерений или неудовлетворительной работе прибора;
- продаже (отправке) потребителю средств измерений или использования их в качестве комплектующих после истечения срока, равного половине межповерочного интервала.

Инспекционную поверку производят для выявления пригодности к применению средств измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Экспертную поверку выполняют при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам, исправности средств измерений и пригодности их к применению в сфере государственной ответственности за качество и единство измерений.

Обязательная поверка средств измерений осуществляется органами Государственной метрологической службы и аккредитованными метрологическими службами юридических лиц под контролем органов Государственной метрологической службы по месту расположения этих юридических лиц. Непосредственно она выполняется физическими лицами, аттестованными в качестве поверителей, в соответствии с *методиками поверки*, утвержденными на основании результатов испытаний средств измерений с целью утверждения типа.

Результаты большого числа периодических поверок однотипных средств измерений могут рассматриваться как материалы испытаний этого типа средств измерений на метрологическую надежность. Количество метрологических отказов при этом может служить основанием для корректировки межповерочного интервала (см. п. 1.4).

Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут подвергаться поверке в *добровольном* порядке.

Глава 4

Передача информации о размерах единиц

4.1. Локальные схемы передачи информации о размерах единиц

Само собой разумеется, что для определения и контроля (при калибровке и поверке средств измерений) метрологических характеристик 1-го вида (см. п. 1.2) рабочие эталоны должны хранить информацию о размере единицы измерения с необходимой точностью. Это проверяется при калибровке или поверке самих рабочих эталонов, принципиально ничем не отличающейся от калибровки или поверки средств измерений. Для калибровки или поверки рабочих эталонов используются рабочие эталоны более высоких разрядов, точность которых в 3...5, иногда в 10 раз выше, чем точность калибруемых (поверяемых). Обобщенная схема калибровки (или поверки) рабочих эталонов приведена на рис. 95.



Рис. 95. Обобщенная схема калибровки или поверки рабочих эталонов

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие калибровку или поверку средств измерений и рабочих эталонов, руководствуются утвержденными в установленном порядке схемами передачи информации о размере единиц. В метрологической литературе и нормативно-технической документации их называют *поверочными схемами*. Впервые поверочная схема была предложена в 1930-х гг. профессором Л. В. Залуцким для линейных измерений [5]. В то время не существовало такого понятия, как калибровка средств измерений. С появлением этого вида метрологических работ термин «поверочная» схема стал некорректным и, более того, нежелательным, так как ретуши-

рует различие между поверкой и калибровкой. В других странах и в международной практике такие схемы называются *калибровочными*. Это название тоже неудачно, так как определение метрологических характеристик 2-го вида (см. п. 1.2) при калибровке не требует информации о размере единицы. Поэтому термин «схема передачи информации о размере единицы», предложенный в 1988 г. [1] и получивший распространение в учебной литературе [2, 3], наиболее правильно отражает суть дела.

Схемы передачи информации о размере единицы всем средствам измерений и рабочим эталонам юридического лица или отдельного ведомства называются *локальными*. Они состоят из чертежа, который допускается дополнять текстовой частью. Чертеж состоит из *полей*, расположенных друг под другом и разделенных штриховыми линиями, обозначающими *ступени* передачи информации о размере единицы. Каждая схема должна состоять не менее чем из трех полей (двух ступеней передачи информации о размере единицы). Наименование полей указывается в левой части чертежа, отделенной вертикальной сплошной линией. В нижнем поле в прямоугольных рамках помещаются названия средств измерений в порядке (слева направо) уменьшения их точности. Выше, в поле рабочих эталонов, разделенном на поля эталонов каждого разряда, помещаются

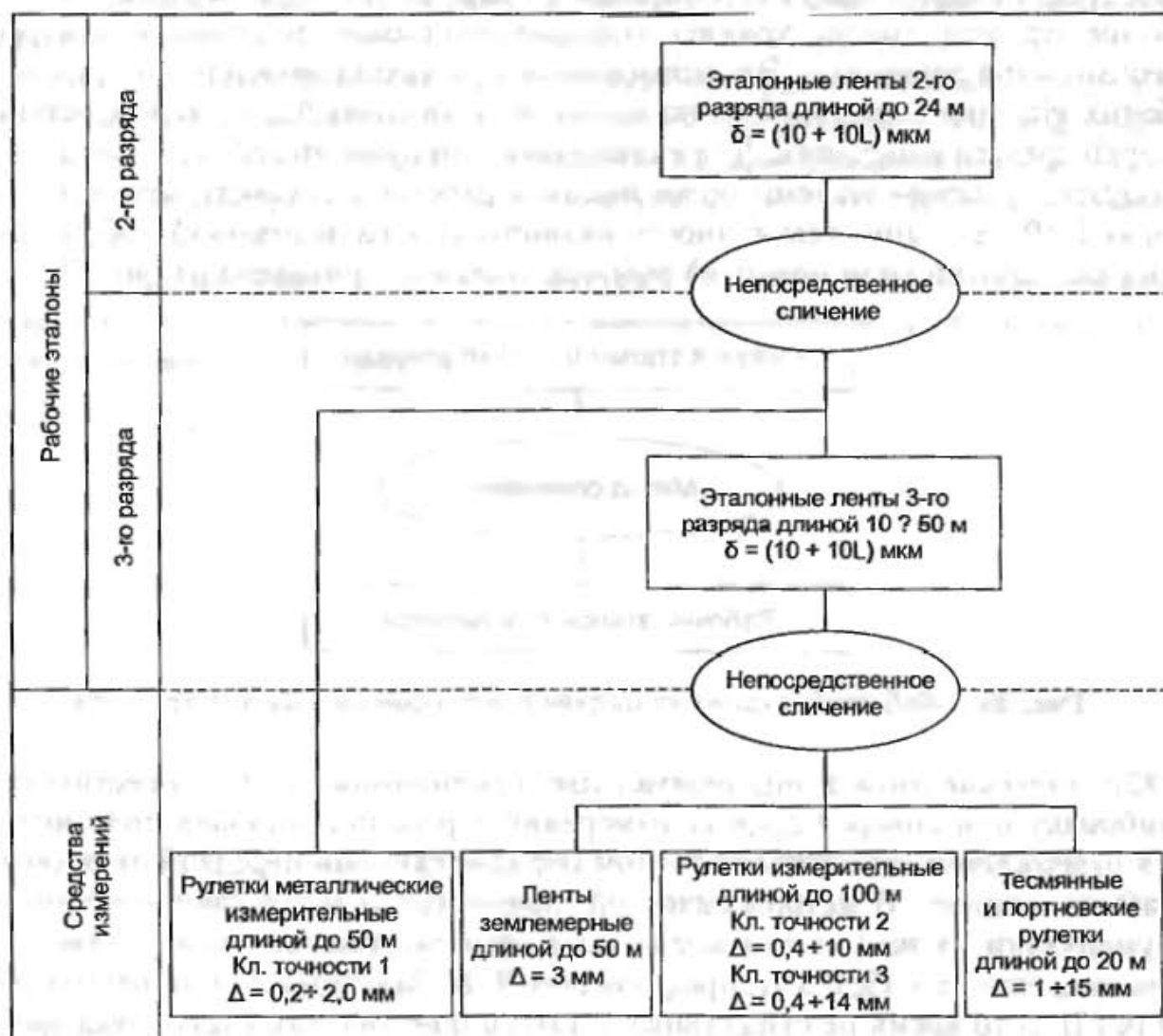


Рис. 96. Локальная схема передачи информации о размере единицы штриховым мерам длины

в порядке уменьшения их разрядов названия рабочих эталонов, также заключенные в прямоугольные рамки. После названий эталонов и средств измерений приводятся диапазоны значений воспроизводимых или измеряемых величин, пределы допускаемой абсолютной δ или относительной δ_0 погрешности, абсолютные δ или относительные δ_0 значения стандартного отклонения результата измерения или воспроизведения при доверительной вероятности, взятой из ряда 0,90; 0,95; 0,99. В разрывах пунктирных линий в овалах указываются методы передачи информации. Пример локальной схемы передачи информации о размере единицы штриховым мерам длины на отдельном предприятии приведен на рис. 96.

Если ведомственную локальную схему передачи информации о размере единицы возглавляет вторичный эталон, то сведения о нем должны размещаться в специально отведенном для этого верхнем поле чертежа. Пример такой локальной схемы приведен на рис. 97, где в овалах указана допускаемая погрешность метода передачи информации о размере единицы.

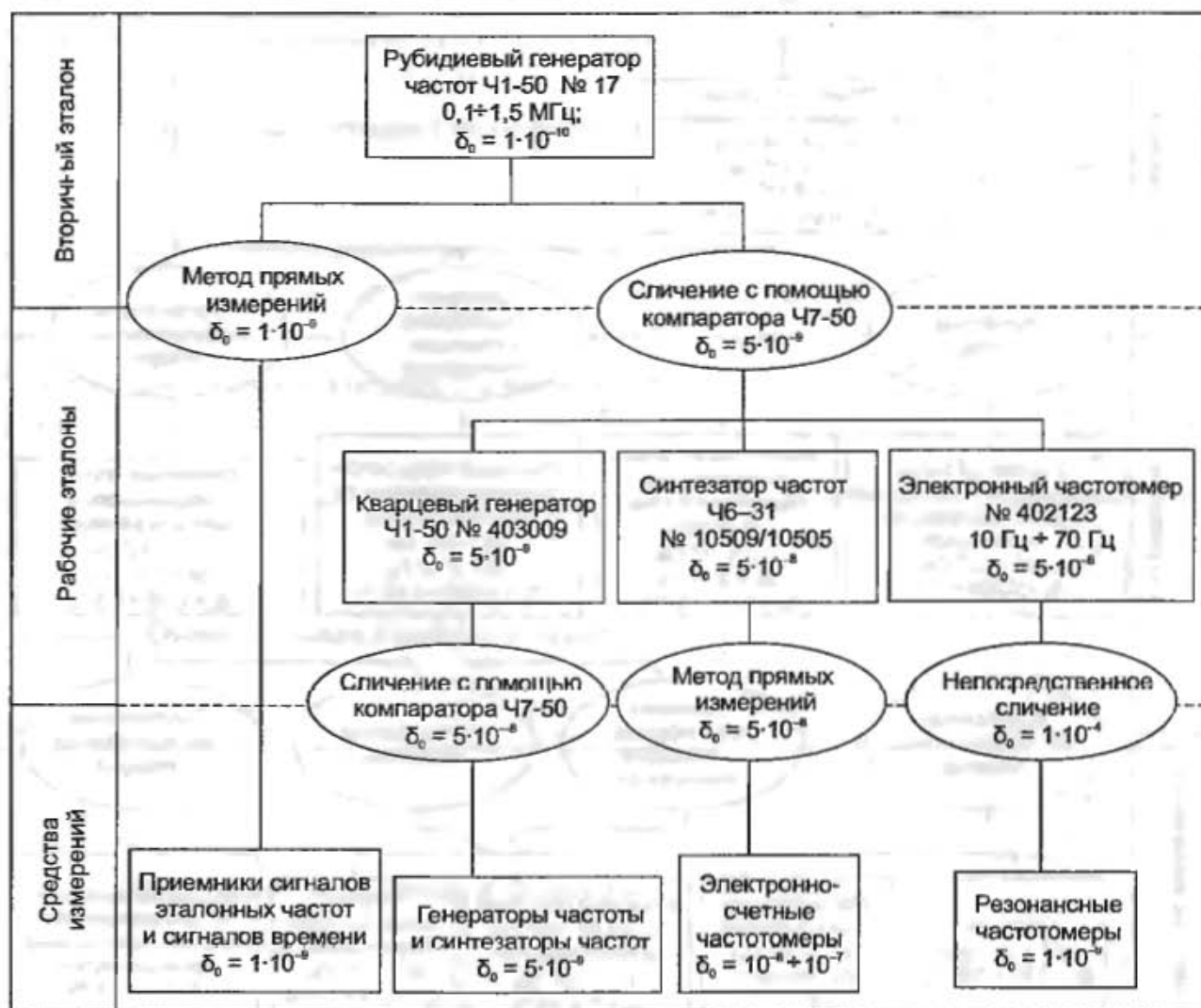


Рис. 97. Локальная схема передачи информации о размере единицы для средств измерений времени и частоты

Точно так же в схемах передачи информации о размере единицы, в которых информация заимствуется от рабочих эталонов из других подобного же рода схем, сведения об этих эталонах должны быть помещены в специально отведенное для этого поле. Пример такой локальной схемы приведен на рис. 98.

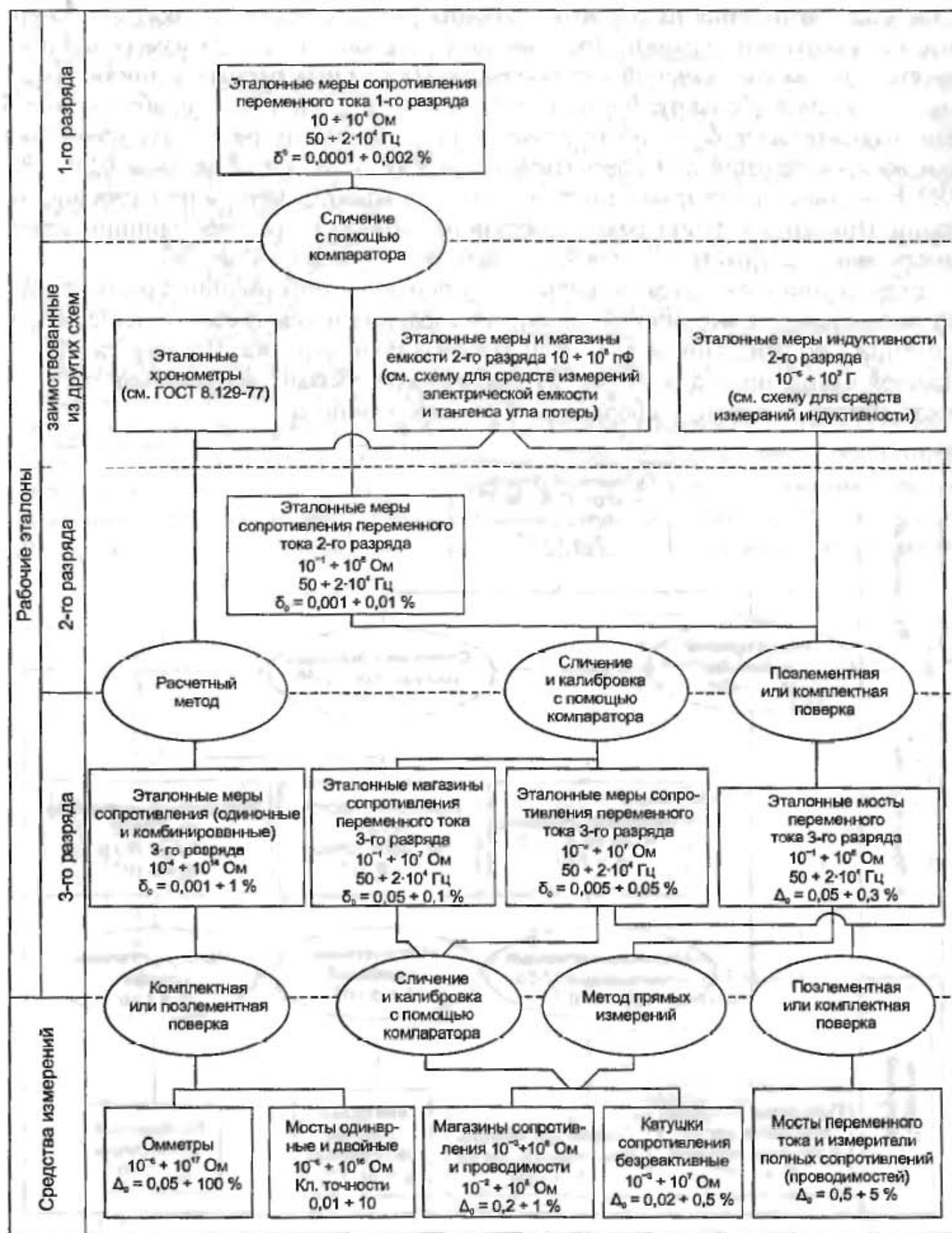


Рис. 98. Локальная схема передачи информации о размере единицы для средств измерений электрического сопротивления

Обозначения, применяемые на схемах передачи информации о размерах единиц, приведены в табл. 12.

Таблица 12

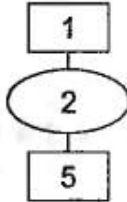
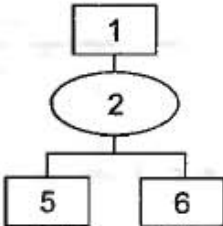
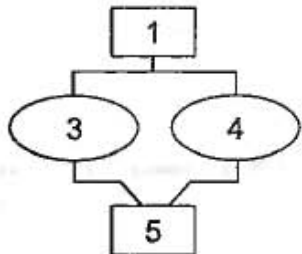
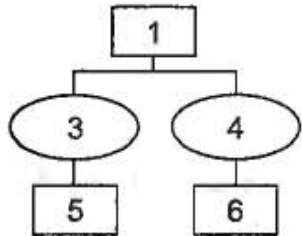
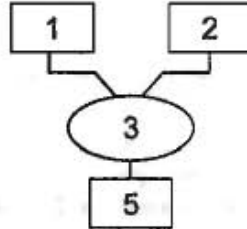
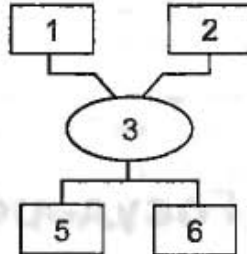
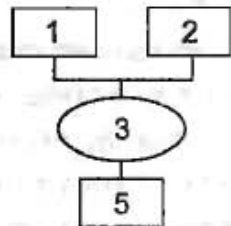
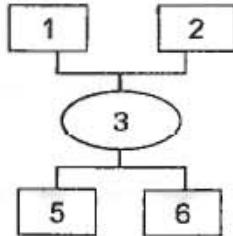
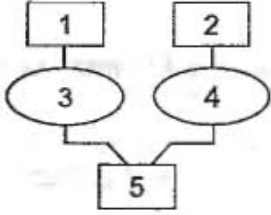
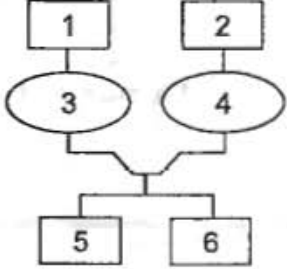
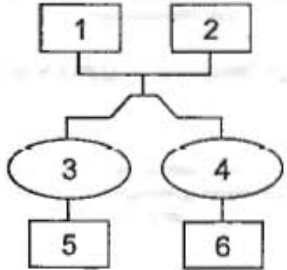
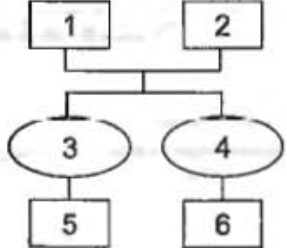
Степень передачи	Графическое изображение
От эталона 1 методом 3 объекту 5	
От эталона 1 методом 3 объектам 5 и 6	
От эталона 1 методом 3 или 4 объекту 5	
От эталона 1 методом 3 объекту 5 и методом 4 объекту 6	
От эталона 1 или 2 методом 3 объекту 5	
От эталона 1 или 2 методом 3 объектам 5 и 6	
От эталонов 1 и 2 единиц различных физических величин методом 3 объекту 5	

Таблица 12 (продолжение)

Степень передачи	Графическое изображение
От эталонов 1 и 2 единиц различных физических величин методом 3 объектам 5 и 6	
От эталона 1 методом 3 или от эталона 2 методом 4 объекту 5	
От эталона 1 методом 3 или от эталона 2 методом 4 объектам 5 и 6	
От эталона 1 или 2 методом 3 объекту 5 или методом 4 объекту 6	
От эталонов 1 и 2 единиц различных физических величин методом 3 объекту 5 и методом 4 объекту 6	

4.2. Государственные схемы передачи информации о размерах единиц

Государственные схемы передачи информации о размерах единиц распространяются на все средства измерений данной физической величины, применяемые в стране. Кроме чертежа они содержат текстовую часть — пояснения к чертежу. Возглавляет государственную схему передачи информации о размере единицы *государственный эталон*, сведения о котором помещаются на чертеже в двойную прямоугольную рамку. Пример компоновки элементов государственной схемы передачи информации о размере единицы приведен на рис. 99.

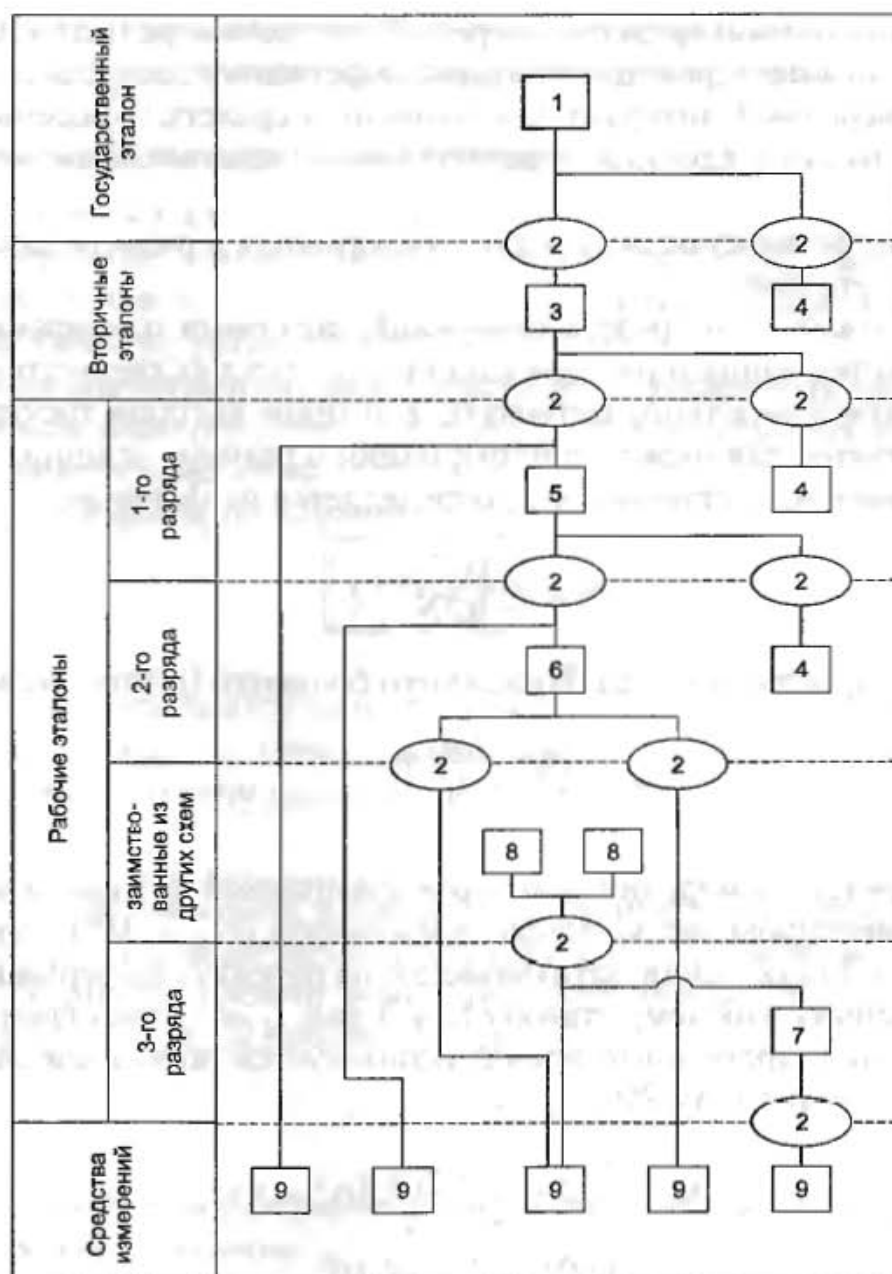


Рис. 99. Пример компоновки государственной схемы передачи информации о размере единицы:

1 — государственный эталон; 2 — метод передачи информации; 3 — вторичный эталон; 4 — эталон сравнения; 5–7 — рабочие эталоны соответствующих разрядов; 8 — рабочие эталоны, заимствованные из других государственных схем; 9 — средства измерений

Разработка государственной схемы передачи информации о размере единицы должна сопровождаться научно-техническим обоснованием оптимальности ее структуры. Главным параметром схемы является *число ступеней* передачи информации о размере единицы. Так как на каждой ступени точность теряется в 3...5, иногда в 10 раз, то чем больше число ступеней, тем с меньшей точностью информация о размере единицы передается средствам измерений. С этой точки зрения число ступеней должно быть как можно меньшим.

Расчет минимального числа ступеней

Исходными данными для расчета являются:

N_{Σ} — общее число средств измерений, для которых составляется схема (с точностью до порядка);

$N_э$ — число эталонов и средств измерений, которым передается информация о размере единицы непосредственно от государственного эталона;

T_1 — межповерочный интервал для эталонов и средств измерений, которым информация о размере единицы передается непосредственно от государственного эталона;

t_1 — время, затрачиваемое на передачу информации о размере единицы от государственного эталона;

ℓ_1 — число эталонов и средств измерений, которыми одновременно может передаваться информация о размере единицы от государственного эталона;

$\tau_э$ — часть межповерочного интервала, в течение которой государственный эталон используется для передачи информации о размере единицы.

Минимальное число ступеней m_{\min} определяется по формуле:

$$m_{\min} = \frac{\lg 2N_{\Sigma}}{\lg 2N_э} + 1,$$

где округление производится до ближайшего большего целого числа, а

$$N_э = \frac{T_1 \ell_1}{t_1} \tau_э.$$

Пример 34

Пусть парк средств измерений некоторой физической величины в стране насчитывает ориентировочно миллион экземпляров ($N_{\Sigma} = 10^6$). Предположим также, что $T_1 = 2$ года; время, затрачиваемое на передачу информации о размере единицы одному рабочему эталону $t_1 = 3$ дня; $\ell_1 = 1$; доля времени, в течение которого государственный эталон используется по назначению, $\tau_э = 0,5$; число рабочих дней в году 250.

Тогда

$$N_э = \frac{T_1 \ell_1}{t_1} \tau_э = \frac{2 \cdot 250 \cdot 1}{3} \cdot 0,5 = 83;$$

$$m_{\min} = \frac{\lg 2N_{\Sigma}}{\lg 2N_э} + 1 = \frac{\lg 2 \cdot 10^6}{\lg 2 \cdot 83} + 1 = 4.$$

На практике нужно учитывать:

- необходимость резерва рабочих эталонов на случай отказа основных, что приводит к неполному использованию парка рабочих эталонов;
- наличие малораспространенных средств измерений, для поверки или калибровки которых необходим специальный рабочий эталон, хотя заведомо известно, что он будет недогружен;
- географическую удаленность некоторых средств измерений, для обслуживания которых в районе их размещения содержится специальный рабочий эталон;
- особенности системы передачи информации о размере единицы данной физической величины, которые требуют дополнительных разрядов рабочих эталонов. Например, непосредственная передача информации о размере единицы от эталонного прибора вышестоящего разряда к эталонному прибору нижестоящего разряда невозможна. Для этого применяют эталонную меру.

В связи с этим полезно оценить максимально возможное число ступеней, определяемое «запасом точности» государственного эталона.

Расчет максимального числа ступеней

Исходными данными для расчета являются:

C_{Σ} — отношение доверительной погрешности государственного эталона к пределу допускаемой погрешности наименее точных средств измерений, поверяемых по низшему разряду рабочих эталонов;

\bar{C} — среднее значение отношения пределов допускаемой погрешности вышестоящих и нижестоящих рабочих эталонов на каждой ступени, а также рабочих эталонов и средств измерений.

Расчет производится по формуле:

$$m_{\max} = \frac{\lg C_{\Sigma}}{\lg \bar{C}} + 1,$$

где округление производится до ближайшего меньшего целого числа. Если окажется, что $m_{\max} < m_{\min}$, то следует заново рассчитать m_{\min} по новым исходным данным. Например, можно принять большим межповерочный интервал T_1 .

Пример 35

Пусть для рассматриваемой в примере 34 физической величины доверительная погрешность государственного эталона $\delta_a = 0,02$ единицы. Предел допускаемой погрешности средств измерений, поверяемых по рабочим эталонам низшего разряда, $\delta_{\text{си}} = 20$ единиц. Тогда

$$C_{\Sigma} = \frac{\delta_a}{\delta_{\text{си}}} = 0,001.$$

Потеря точности на каждой ступени составляет 3...5 (до 10) раз. Допустим, $\bar{C} = \frac{1}{3} = 0,33$. Тогда получим:

$$m_{\max} = \frac{\lg C_{\Sigma}}{\lg \bar{C}} + 1 = \frac{-3}{-0,5} + 1 = 7.$$

Таким образом, государственная схема передачи информации о размере единицы может состоять из 4...7 ступеней.

4.3. Прослеживаемость эталонов и средств измерений

При воспроизведении *единицы* измеряемой физической величины государственным эталоном и многоступенчатой передаче информации о ее размере средствам измерений *единство измерений* обеспечивается благодаря следующим обстоятельствам. С одной стороны, то, что значение измеренной величины находится в определенном интервале, устанавливается с необходимой достоверностью. С другой стороны, поправка θ к показанию X средства измерений обеспечивает его *правильность*, приводя к такому значению, которое в тех же

условиях было бы получено стоящим на ступень выше рабочим эталоном. Придавая результатам измерений, показаниям и поправкам индексы, соответствующие разрядам в цепи передачи информации о размере единицы, при четырехступенчатой передаче, например, получим:

$$Q = X + \theta = X + (Q_3 - X) = Q_3;$$

$$Q_3 = X_3 + \theta_3 = X_3 + (Q_2 - X_3) = Q_2;$$

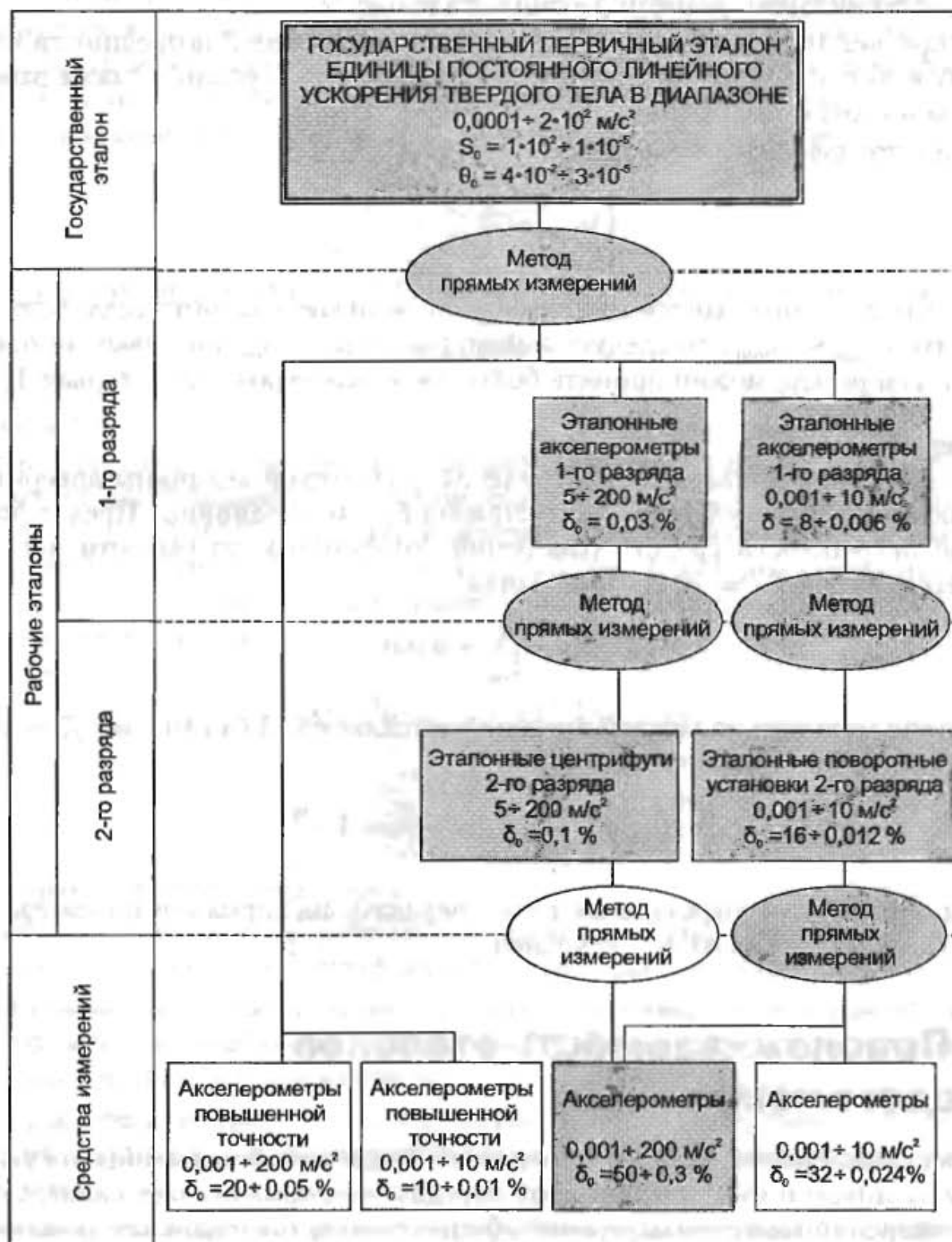


Рис. 100. Государственная схема передачи информации о размере единицы для средств измерений постоянного линейного ускорения твердого тела в диапазоне $0,001 \div 2 \cdot 10^2 \text{ м/с}^2$

$$Q_2 = X_2 + \theta_2 = X_2 + (Q_1 - X_2) = Q_1;$$

$$Q_1 = X_1 + \theta_1 = X_1 + (Q_{13} - X_1) = Q_{13},$$

где Q_{13} — случайное значение результата измерения, которое было бы получено при сравнении неизвестного размера с размером единицы, воспроизводимым государственным эталоном. Таким образом, прослеживается связь средства измерений, стоящего на нижней ступени передачи информации о размере единицы, с государственным эталоном, стоящим на верхней ступени, проходящая через рабочие эталоны соответствующих разрядов, занимающие места на промежуточных ступенях.

Под прослеживаемостью понимают свойство эталона или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки

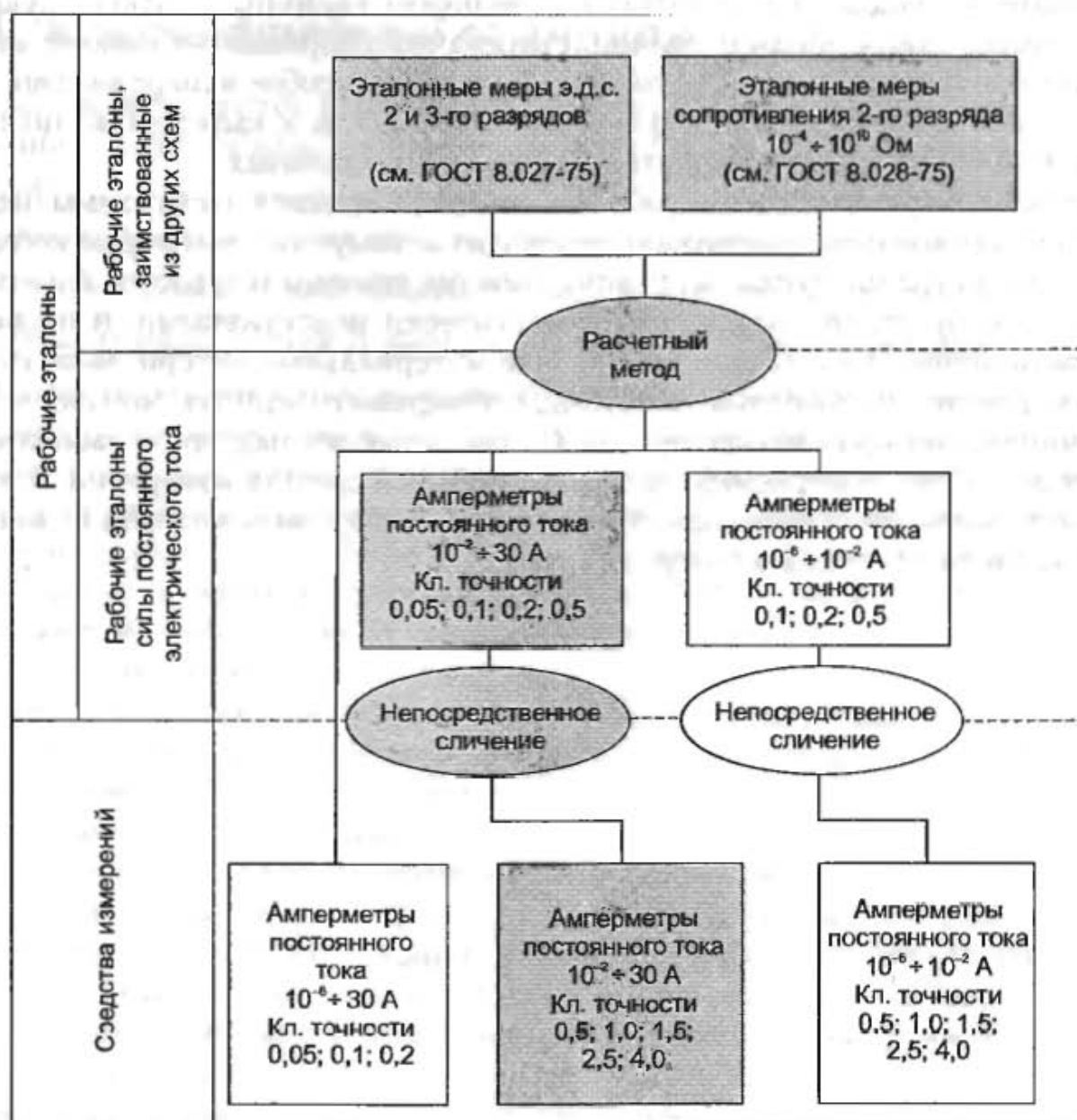


Рис. 101. Фрагмент государственной схемы передачи информации о размере единицы для средств измерений силы постоянного электрического тока в диапазоне $1 \cdot 10^{-12} \div 30$ А

средств измерений. На государственной схеме передачи информации о размере единицы прослеживаемость конкретного средства измерений или рабочего эталона можно проиллюстрировать так, как это показано на рис. 100. Ключевым в определении прослеживаемости является требование *документального* подтверждения связи с государственным первичным эталоном. Поэтому, если исходными являются эталоны, заимствованные из других государственных схем передачи информации о размерах единиц, ссылка на соответствующие ГОСТ является обязательной. Пример такой схемы показан на рис. 101.

Воспроизводимый государственным первичным эталоном размер не вполне точно соответствует определению единицы SI, что компенсируется поправкой θ_m , устанавливаемой при метрологической аттестации эталона. Поэтому

$$Q_m = X_m + \theta_m = X_m + (Q_0 - X_0) = Q_0,$$

где Q_0 — случайное значение результата измерения, которое было бы получено при сравнении неизвестного размера с размером единицы, соответствующим определению. Таким образом, если при передаче информации о размере единицы правильно определены и учтены все поправки, то любое измерение сводится к сравнению неизвестного размера с единицей SI, т. е. к выражению значения измеряемой физической величины в узаконенных единицах.

Ошибка II рода при поверке рабочего эталона в верхней части схемы передачи информации о размере единицы приводит к тому, что некоторые соподчиненные ему метрологически исправные рабочие эталоны и средства измерений при поверке будут признаваться метрологически неисправными, и наоборот. Цена такой ошибки настолько велика, что материальные потери даже трудно оценить. Для их уменьшения желательно обнаружить ошибку раньше, чем по истечении межповерочного интервала. С этой целью в поверочной лаборатории следует вести учет поверяемых рабочих эталонов и средств измерений, и в случае внесения в их показания одной и той же поправки, знак которой не меняется, провести внеочередную поверку эталона.

Глава 5

Эталоны

5.1. Классификация эталонов

Эталонами называются технические средства, выполненные по особой спецификации и официально утвержденные в установленном порядке, с помощью которых

- воспроизводят и хранят единицу физической величины, или
- получают и хранят информацию о размере единицы физической величины и
- передают информацию о размере единицы средствам измерений.

Использовать эталоны для практических измерений запрещено. Для этого существуют *средства измерений*, которым информация о размере единицы передается непосредственно от *рабочих эталонов*. По точности рабочие эталоны делятся на *разряды*, в соответствии с которыми занимают свои места в цепи передачи информации о размере единицы так, как это показано на рис. 96–101. В свою очередь, рабочие эталоны получают информацию о размере единицы от *вторичных эталонов*, в число которых входят эталоны-копии, эталоны сравнения и эталоны-свидетели.

Рабочие эталоны редко проектируются и выпускаются как таковые. Гораздо чаще в качестве них аттестуются обычные средства измерений (меры, измерительные приборы), отличающиеся высокой стабильностью и воспроизводимостью показаний, с тщательно изученными и по возможности улучшенными метрологическими характеристиками. Это самые распространенные эталоны.

Эталон-копия предназначен для передачи информации о размере единицы рабочим эталонам. Их создают с целью предохранения исходного (первичного или специального) эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляет собой копии государственных эталонов только по метрологическому назначению.

Эталон сравнения применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом.

Если эталон-копия или эталон сравнения предназначены для транспортировки к месту поверки (калибровки) средств измерений или сличения эталонов

данной единицы физической величины, то они называются *транспортируемыми*.

Эталон-свидетель служит для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. В настоящее время остался только один эталон-свидетель у государственного первичного эталона единицы массы — килограмма.

Эталон, воспроизводящий единицу физической величины с наивысшей в стране точностью, называется *первичным*. Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях (например, на высоких и сверхвысоких частотах, при низкой или высокой температуре, давлении, особых состояниях веществ и т. п.) и заменяющий в этих условиях первичный эталон, называется *специальным*. Официально утвержденные в качестве *исходных* для страны первичные и специальные эталоны называются *государственными*.

Государственные эталоны являются национальным достоянием, ценностями особой государственной значимости. Они создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. Местами хранения государственных эталонов служат особые эталонные помещения, в которых поддерживается строгий режим по влажности, температуре, вибрациям и другим влияющим величинам. Для обслуживания государственных эталонов из числа ведущих специалистов-метрологов назначаются ученые хранители эталонов, облеченные особыми полномочиями. Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран. В этих случаях, а также в случае сличения с международными эталонами государственные эталоны называются *национальными*.

Международными называются эталоны, принятые по международным соглашениям в качестве основы для согласования размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

К международным эталонам относятся *межгосударственные эталоны СНГ*, обеспечивающие воспроизведение и хранение единиц физических величин с точностью, удовлетворяющей потребности стран-членов СНГ. Они предназначены и применяются для передачи информации о размере единиц эталонам заинтересованных государств содружества, подписавших Соглашение «О проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации». На основании предложений государств-участников Соглашения Научно-техническая комиссия по метрологии (НТКМетр) Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации планирует создание межгосударственных эталонов. Они создаются на базе:

- одного или нескольких существующих государственных эталонов государств-участников Соглашения (межгосударственные одиночный или групповой эталоны);
- комплекса средств измерений, специально разработанного для последующего утверждения в качестве межгосударственного эталона двух или более заинтересованных государств-участников Соглашения (в соответствии с предварительно согласованными требованиями).

Утверждаются межгосударственные эталоны Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации по представлению НТКМетр.

По своему составу эталоны делятся на:

- *одиночные эталоны*, имеющие в своем составе одно лишь средство измерений (меру, измерительный прибор или эталонную установку) для воспроизведения и (или) хранения единицы;
- *групповые эталоны*, в состав которых входит совокупность средств измерений одного типа, номинального значения или диапазона измерений;
- *эталонные наборы*, состоящие из совокупности средств измерений, позволяющих воспроизводить и (или) хранить единицу в диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств (например, набор эталонных гирь, эталонные наборы ареометров).

5.2. Государственные эталоны основных единиц

Эталоны основных единиц состоят из воспроизводящей части и приспособлений или устройств, обеспечивающих съём и передачу информации о размере единицы. Во всех без исключения случаях результат воспроизведения является случайной величиной.

Основных единиц в Международной системе семь: *секунда, метр, килограмм, кельвин, кандела, ампер и моль*. Соответственно должно было бы быть и семь государственных первичных эталонов основных единиц. Однако в эталоне моля нет необходимости. В 0,012 кг изотопа углерода-12 содержится $6,022 \cdot 10^{23}$ атомов. Это число называется *числом Авогадро*. Если число структурных элементов, составляющих вещество, известно, то деление его на число Авогадро дает количество вещества в молях. Можно при необходимости воспроизвести 1 моль любого вещества как $6,022 \cdot 10^{23}$ его структурных элементов. Масса одного моля водорода, например, составляет 2 г, кислорода — 32 г, воды — 18 г и т. д.

5.2.1. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени хранится в поселке Менделеево под Москвой во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Он воспроизводит основную единицу СИ *секунду* в соответствии с ее определением (см. п. 6.4.2). Принципиальная схема воспроизводящей части эталона показана на рис. 102. Атомы цезия-133 испускаются нагретым источником 1. Пучок этих атомов попадает в область неоднородного магнитного поля, создаваемого магнитом 2. Угол отклонения атомов в таком магнитном поле определяется их магнитным моментом. Поэтому неоднородное магнитное поле позволяет выделить из пучка атомы, находящиеся на определенном энергетическом уровне. Эти атомы направляются в объемный резонатор 3, пролетая через который взаимодействуют с переменным электромагнитным

полем сверхвысокой частоты. Частота электромагнитных колебаний в резонаторе может регулироваться в небольших пределах. При совпадении ее с частотой, соответствующей энергии квантовых переходов, происходит поглощение энергии СВЧ-поля, и атомы цезия-133 переходят в основное состояние. Отклоняющей магнитной системой 4 они направляются на детектор 5. Ток детектора при настройке резонатора на частоту квантовых переходов оказывается максимальным. Этой частоте приписывается значение $9\,192\,631\,770$ Гц, а промежуток времени, равный $9\,192\,631\,770$ периодам сверхвысокочастотных колебаний, принимается равным 1 с.

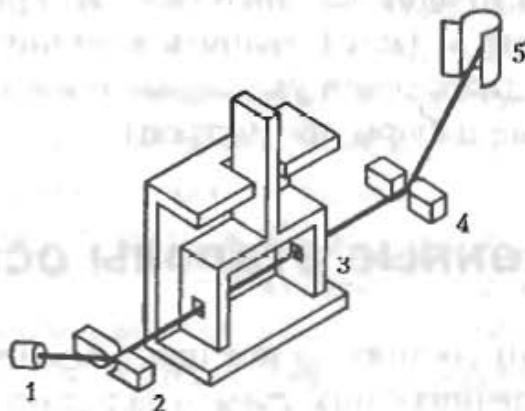


Рис. 102. Принципиальная схема цезиевого репера частоты

Долговременная стабильность цезиевого репера частоты невелика. Поэтому для хранения единиц времени и частоты в состав государственного первичного эталона входит водородный мазер. Принцип действия его показан на рис. 103.

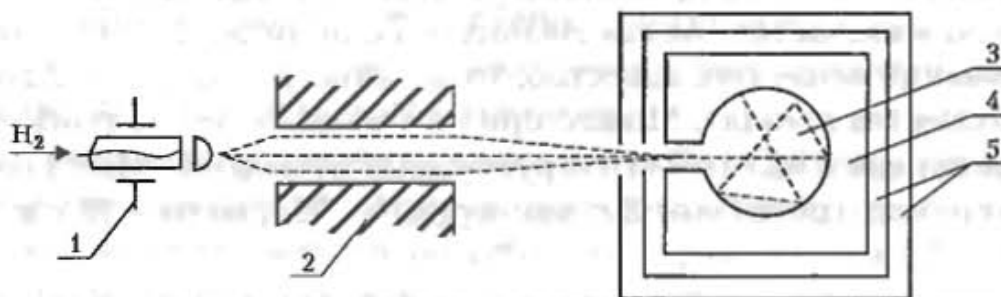


Рис. 103. Принципиальная схема мазера на атомарном водороде

В стеклянной трубке 1 под действием высокочастотного электрического разряда происходит диссоциация молекул водорода. Пучок атомов водорода через коллиматор попадает в неоднородное магнитное поле шестиполюсного осевого магнита 2, где претерпевает пространственную сортировку. В результате последней на вход накопительной ячейки 3, расположенной в объемном резонаторе 4, попадают лишь атомы водорода, находящиеся на верхнем энергетическом уровне. Находящийся внутри многослойного экрана 5 высокочастотный резонатор настроен на частоту используемого квантового перехода. Взаимодействие возбужденных атомов с высокочастотным полем резонатора (в течение примерно 1 с) приводит к их переходу на нижний энергетический уровень с одновременным излучением квантов энергии на резонансной частоте $1\,420\,405\,751,8$ Гц. Это вызывает самовозбуждение генератора, частота которого отличается высо-

кой стабильностью. Ее значение периодически поверяется по цезиевому реперу.

Наряду с водородным мазером для формирования и хранения шкалы времени в состав государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени входит группа квантово-механических часов. Это непрерывно действующий сложный технический комплекс, главное внимание в котором уделено поддержанию длительного режима работы с высокой стабильностью показаний.

Кроме того, в состав эталона входит аппаратура для передачи информации о размерах единиц при внутренних и внешних сличениях (лазеры, СВЧ-генераторы, квантовые часы) и средства обеспечения.

Диапазон временных интервалов, воспроизводимых эталоном, составляет ($10^{-10} \dots 10^8$) с; стандартное отклонение результата воспроизведения — 10^{-14} с; неисключенная систематическая погрешность — $5 \cdot 10^{-14}$ с.

Особенностью государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени является то, что воспроизводимая им единица времени *секунда* используется в государственном первичном эталоне единицы длины для воспроизведения *метра* по определению, принятому XVII Генеральной конференцией по мерам и весам в 1983 г. (см. п. 6.4.2). Однако *секунда* воспроизводится в сверхвысокочастотном диапазоне радиоволн, а *метр* по определению должен воспроизводиться в оптическом. Оптические частоты на 3–4 порядка выше СВЧ. Поэтому, образно говоря, потребовалось из одного диапазона в другой перекинуть мост для передачи эталонной точности. Входящий в состав государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени радиооптический частотный мост (РОЧМ) решает эту задачу в несколько этапов, на каждом из которых используется принцип повышения частоты, общий для всех синтезаторов частот: смещение на нелинейном элементе высокочастотных гармоник опорных сигналов.

На первом этапе эталонная точность воспроизведения единиц передается в субмиллиметровый диапазон. При этом частота 3 557 147,5 МГц D_2O -лазера, работающего на длине волны $\lambda = 84$ мкм, с помощью лазера на парах синильной кислоты HCN ($\lambda = 337$ мкм) и клистронов с номинальными частотами 74 и 8,2 ГГц привязывается посредством специальной системы фазовой синхронизации к эталонной частоте цезиевого репера.

На втором этапе эталонная точность передается из субмиллиметрового в инфракрасный диапазон электромагнитных волн. Для этого используется стабилизированный CO_2 -лазер ($\lambda = 10,6$ мкм), частота которого привязывается к восьмой гармонике D_2O -лазера и синхронизируется с частотой цезиевого репера.

На третьем этапе специальной системой фазовой автоподстройки к частоте этого лазера привязывается частота CO_2 -лазера с $\lambda = 10,2$ мкм, третья гармоника которой суммируется с частотой клистронов 48 ГГц и сравнивается на нелинейном элементе с частотой мощного гелий-неонового лазера, синхронизированного по стабилизированному He-Ne/ CH_4 -лазеру с длиной волны излучения $\lambda = 3,39$ мкм. В результате измерения частоты биений это последнее звено РОЧМ — He-Ne/ CH_4 -лазер аттестуется по первичному цезиевому реперу.

В итоге частотный диапазон государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени расширяется от 1 до 10^{14} Гц со стандартным отклонением в диапазоне частот РОЧМ ($10^{10} \dots 10^{14}$) Гц — 10^{-12} Гц.

Расширить с помощью РОЧМ диапазон воспроизведения единиц времени и частоты до видимой части спектра электромагнитных волн не удастся. Между тем именно оптический диапазон наиболее удобен для перехода интерферометрическим методом от длин волн электромагнитного излучения к конечным и штриховым мерам длины. Поэтому по выходному He-Ne/CH₄-лазеру РОЧМ, входящему в состав государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, устанавливается длина волны излучения перевозного He-Ne/CH₄-лазера, входящего уже в состав государственного первичного эталона единицы длины и служащего для передачи этому эталону единиц времени и частоты.

5.2.2. Государственный первичный эталон единицы длины

Государственный первичный эталон единицы длины находится в Санкт-Петербурге во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева). Единицы времени и частоты доставляются к нему от государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени с помощью перевозного He-Ne/CH₄-лазера. По нему аттестуется гелий-неоновый лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения иода-127. Излучение He-Ne/I₂-лазера относится уже к видимой части диапазона ($\lambda = 0,633$ мкм). На специальной установке, основу которой составляет вакуумированный модуляционный интерферометр Фабри–Перо, сравнивается количество длин волн излучения лазера He-Ne/CH₄ и He-Ne/I₂, укладываемых на одном и том же элементе длины. По их отношению с эталонной точностью определяется длина волны излучения He-Ne/I₂-лазера. Затем с помощью интерференционного компаратора на основании измерения порядка интерференции N аттестуются концевые и штриховые меры длины, согласно соотношению

$$L = N\lambda.$$

Длина волны λ , воспроизводимая эталонным источником излучения гелий-неоновым лазером, стабилизированным по линии насыщенного поглощения молекулы $^{127}\text{J}_2$, равна 632,99139822 нм. Установка для измерения отношений длин волн обеспечивает передачу размера единицы длины источникам эталонных излучений в диапазоне (0,4...11,0) мкм с суммарной погрешностью ($3 \cdot 10^{-11} \dots 1 \cdot 10^{-9}$) мкм. Диапазон воспроизведения длины ($5 \cdot 10^{-9} \dots 1,0$) м со стандартным отклонением $2 \cdot 10^{-11}$ м (что на два порядка меньше стандартного отклонения результата воспроизведения *метра* по старому определению с помощью криптоновой лампы — $4 \cdot 10^{-9}$ м) и неисключенной систематической погрешностью $1,5 \cdot 10^{-11}$ м.

Эталонный комплекс обеспечивает передачу размера единицы длины вещественным мерам длины, измерителям линейных перемещений, преобразователям линейных перемещений:

- в диапазоне ($1 \cdot 10^{-3} \dots 1,0$) м с суммарной погрешностью $(0,015 + 0,01L)$ мкм, где L — длина в метрах;
- в диапазоне ($1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-3}$) м с суммарной погрешностью 0,015 мкм;
- в диапазоне ($5 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-6}$) м с суммарной погрешностью 0,003 мкм.

5.2.3. Государственный первичный эталон единицы массы

Государственный первичный эталон единицы массы хранится в Санкт-Петербурге во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Единица массы — килограмм — воспроизводится до сих пор гирей из платино-иридиевого сплава (90 % Pt и 10 % Ir), изготовленной в 1883 г. английской фирмой «Джонсон, Маттей и К°». Эта гиря является национальным прототипом килограмма, полученным по жребию Россией в 1889 г. согласно Метрической конвенции в качестве копии № 12 Международного прототипа килограмма, хранящегося в Международном бюро мер и весов.

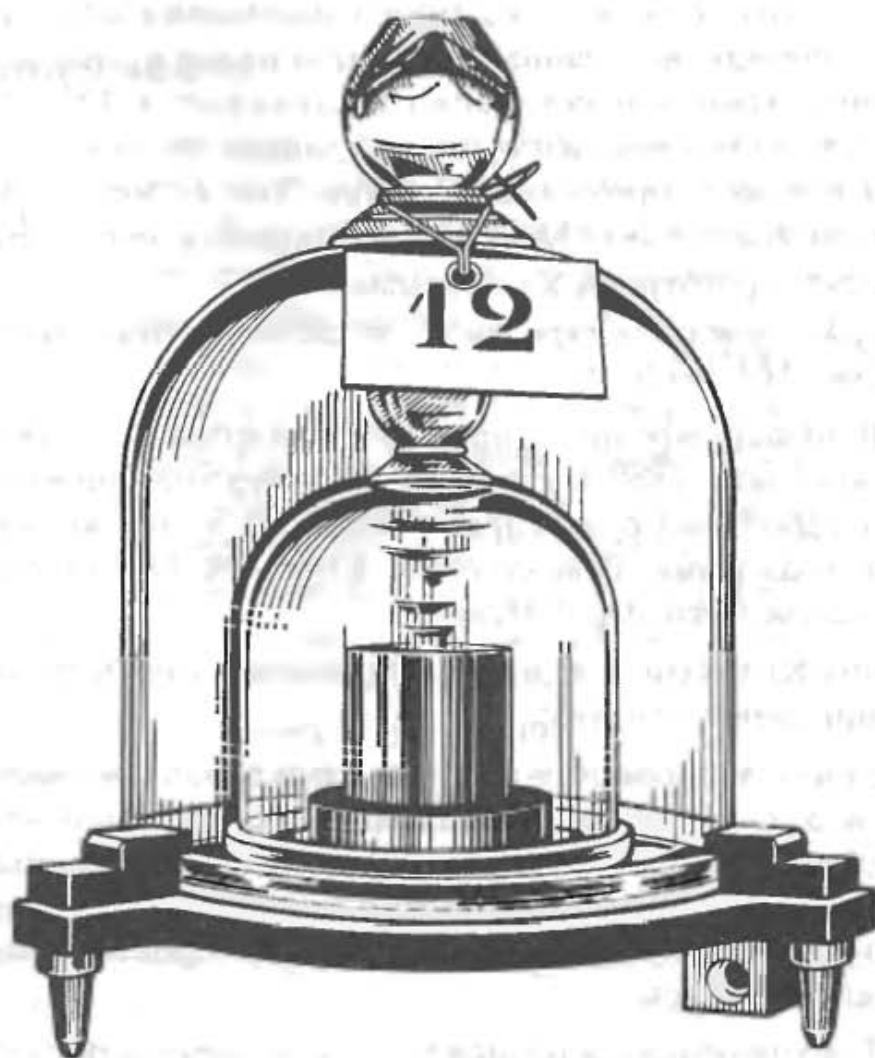


Рис. 104. Платино-иридиевая гиря, входящая в состав государственного первичного эталона единицы массы — килограмма

Гиря, показанная на рис. 104, имеет форму цилиндра с высотой и диаметром основания, равными 39 мм. Ее масса близка к массе одного кубического дециметра дистиллированной воды при температуре + 3,96 °С. Гиря хранится на кварцевой подставке под двумя притертыми стеклянными колпаками в стальном шкафу особого сейфа, находящегося в термостатированном помещении. О стабильности *государственного первичного эталона единицы массы* можно судить по следующим результатам сличения гири с Международным прототипом килограмма в Международном бюро мер и весов более чем за 100 лет:

Год аттестации в МБМВ	Результат измерения массы национального прототипа килограмма	Погрешность аттестации
1889	1 кг ± 0,068 мг	±0,002 мг
1936	1 кг ± 0,04 мг	
1948	1 кг ± 0,085 мг	
1979	1 кг ± 0,088 мг	±0,008 мг
1993	1 кг ± 0,100 мг	±0,0023 мг

Как видно из приведенных данных, несмотря на все предосторожности, масса гири с течением временем неуклонно увеличивается. Объясняется это адсорбцией молекул из окружающей среды, оседанием пыли на поверхность гири и образованием тонкой коррозионной пленки. Тем не менее копия Международного прототипа килограмма № 12 по стабильности массы относится к лучшим национальным прототипам килограмма.

В состав *государственного первичного эталона единицы массы* кроме гири, показанной на рис. 104, входят:

- копия № 26 Международного прототипа килограмма, также полученная Россией по жребию в 1889 г. согласно Метрической конвенции. Эта копия представляет собой такую же гирю и хранится в том же сейфе под двумя стеклянными колпаками. Она заменяет копию № 12 в период ее сличений в Международном бюро мер и весов;
- эталонная гиря R1 массой 1 кг и набор эталонных гирь массой от 1 г до 500 г из платино-иридиевого сплава;
- эталонные весы-компараторы с наибольшими пределами взвешивания 1 кг, 200 г, 25 г и 3 г, имеющие стандартные отклонения показаний 0,01 мг, 0,005 мг, 0,001 мг и 0,0004 мг соответственно. Все они установлены на специальном фундаменте, изолированном от фундамента основного здания. Это существенно уменьшает влияние вибраций на процесс взвешивания при сличении эталонов массы.

Один раз в 7 лет проводятся периодические исследования *государственного первичного эталона единицы массы*. Во время этих исследований производят взаимные сличения национального прототипа килограмма — копии № 12 Меж-

дународного прототипа килограмма с копией № 26 Международного прототипа килограмма и с эталонной гирей R1 на эталонных весах-компараторе с наибольшим пределом взвешивания 1 кг.

Эталонные весы-компараторы используются также для передачи единицы массы от национального прототипа килограмма — копии № 12 Международного прототипа килограмма эталонам-копиям.

При передаче единицы массы от национального прототипа килограмма — копии № 12 Международного прототипа килограмма рабочим эталонам (гилям из нержавеющей стали) наибольшую погрешность в результате измерения вносит действие аэростатических сил на разнообъемные эталоны. Поправка на действие аэростатических сил зависит от плотности воздуха и достигает 96 мг. Чтобы при такой поправке получить результат измерения с погрешностью 0,005 мг, необходимо при взвешивании разнообъемных гирь измерять плотность воздуха с относительной погрешностью $5 \cdot 10^{-5}$. С учетом погрешностей от действия аэростатических сил и от изменения адсорбированной пленки на поверхности гирь относительная суммарная погрешность передачи размера единицы массы от первичного эталона из платино-иридиевого сплава эталонам-копиям из стали не превышает 10^{-8} .

5.2.4. Государственный первичный эталон единицы силы света

Единица силы света — *кандела* — по последнему определению, данному XVI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1979 г. (см. п. 6.4.2), воспроизводится во ВНИИОФИ — Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (г. Москва) *государственным первичным эталоном единицы силы света*, утвержденным в 1983 г.

Основу эталона составляет модель черного тела (МЧТ) 1, помещенная в вакуумную камеру излучателя 2 (рис. 105). МЧТ представляет собой две коаксиальные трубки из карбида ниобия. Передние концы трубок соединены кольцеобразной перегородкой. Электрический ток, протекая последовательно по трубкам, нагревает внутреннюю из них до температуры 2700 К. Излучение черного тела при такой температуре мало отличается по своему спектральному составу от излучения ламп накаливания, широко используемых в качестве источников света. Это облегчает аттестацию последних в качестве вторичных эталонов. Стабилизация температуры осуществляется системой автоматического регулирования 3 с оптической обратной связью в цепи электропитания МЧТ. В качестве преобразователя на входе системы используется специальный фотопирометр 4.

Собственно моделью черного тела является полость внутренней трубки, имеющей диаметр 19 мм. В середине этой трубки расположена перегородка из карбида ниобия. На расстоянии 350 мм от перегородки и в 60 мм от переднего конца помещена диафрагма диаметром 12 мм. Наружная трубка в системе тепловых экранов служит для выравнивания температуры вдоль внутренней трубки.

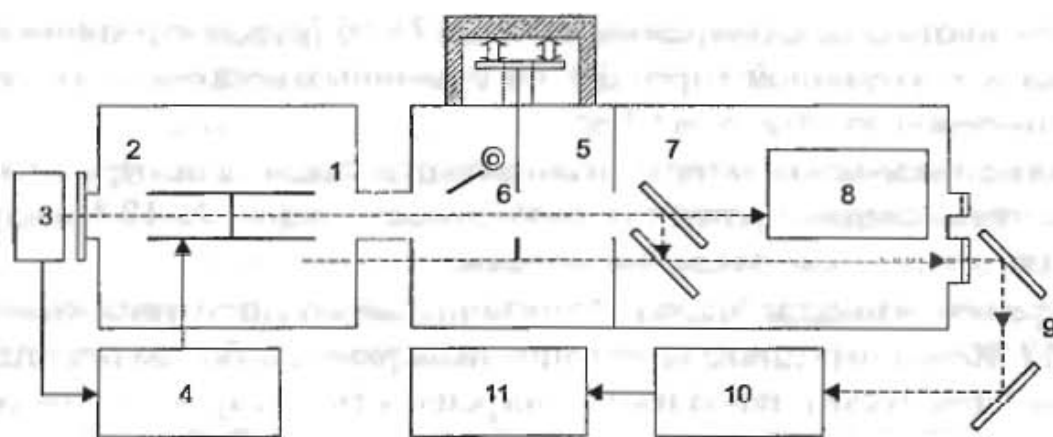


Рис. 105. Оптическая система государственного первичного эталона единицы силы света

Излучение из внутренней трубки проходит в камере 5 через охлаждаемую апертурную диафрагму 6 с точно определяемой площадью. Наличие системы подвижек и системы контроля положения МЧТ позволяет юстировать ее относительно оси установки.

В камере 7 размещается первичный фотометр. Он состоит из светофильтра и радиометра 8. Светофильтр выполнен в виде стеклянной кюветы, заполненной раствором двуххромовокислого калия, хлорной меди и двойной серно-кобальто-аммониевой соли. С его помощью выделяется спектральная составляющая излучения МЧТ на частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц (что соответствует длине волны 555,016 нм). Радиометр представляет собой радиационный термостолбик. Его приемный элемент изготовлен из алюминиевой фольги в виде конической полости с углом при вершине 15° и диаметром основания 15 мм. Перед полостью помещена система защитных диафрагм и входная диафрагма диаметром 8 мм. Калибровка радиометра осуществляется по излучению МЧТ. При этом он размещается в камере, имеющей одинаковый вакуумированный объем с камерой 2. Излучение МЧТ поочередно направляется то в радиометр, то через боковое окно вакуумной камеры и зеркальную оптическую систему 9 в спектропиометр 10. Для обработки измерительной информации, состоящей в решении избыточной системы линейных алгебраических уравнений, используется ЭВМ 11.

Стандартное отклонение при воспроизведении *канделы* составляет 10^{-3} кд, неисключенный остаток систематической погрешности $2,5 \cdot 10^{-3}$ кд.

Для передачи информации о размере *канделы* от *государственного первичного эталона единицы силы света* лампам, входящим в состав рабочего эталона, радиометр перемещается в вакуумированный кожух, герметично соединенный со стеклом, входящим в состав светофильтра. Установка для передачи информации о размере единицы включает компаратор, лампу сравнения и комплекс устройств для измерения расстояний, основанный на использовании нутромера НМИ-6000. По сигналу первичного фотометра при облучении его лампой сравнения определяется освещенность на его входной диафрагме. При помощи компаратора, в основе которого лежит фотодиод, лампу сравнения, в качестве которой используется светоизмерительная лампа СИС-107-1500, сличают с излучателем рабочего эталона, в результате чего находят силу света излучателя.

Таким образом от низкочувствительного первичного фотометра *государственного первичного эталона единицы силы света* информация о размере единицы передается маломощным лампам, входящим в групповой излучатель рабочего эталона.

Стандартное отклонение результата сличения рабочего эталона с *государственным первичным эталоном единицы силы света* составляет $3 \cdot 10^{-3}$ кд.

5.2.5. Государственный первичный эталон единицы силы постоянного электрического тока

Введенный в эксплуатацию с 1 июля 1992 г. *государственный первичный эталон единицы силы постоянного тока* состоит из воспроизводящей части и компаратора постоянного тока, обеспечивающего съем и передачу информации о размере единицы рабочему эталону (рис. 106). Обе эти составные части эталона термоизолированы при температуре жидкого гелия 4,2 К.

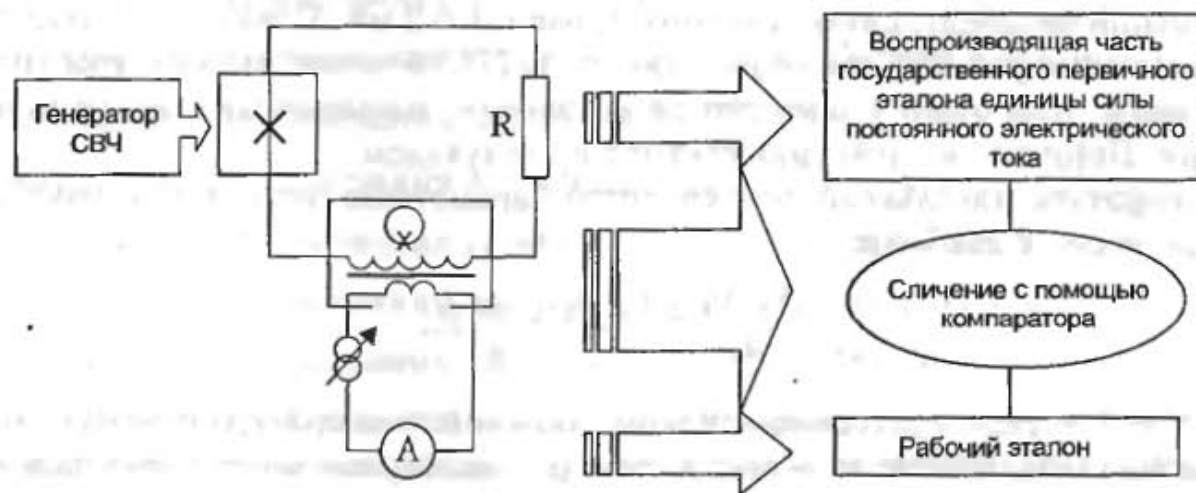


Рис. 106. Схема воспроизведения единицы силы постоянного электрического тока и передачи информации о ее размере

Воспроизводящая часть состоит из интегральной схемы, состоящей из трех последовательно соединенных переходов Джозефсона, и сопротивления $R = 1$ Ом, аттестованного по эталону *ома*, включающего установку на квантовом эффекте Холла (см. п. 6.2.2). Интегральная схема облучается сверхвысокочастотным электромагнитным полем с частотой ~ 10 ГГц, что позволяет получить на одной ступени вольтамперной характеристики джозефсоновского перехода напряжение $U \approx 20$ мкВ, а на 50 ступенях $U \approx 1$ мВ. Таким образом, в последовательном контуре, образованном мерами напряжения, сопротивления и первичной обмоткой компаратора постоянного тока, состоящей из $N_1 = 1000$ витков, циркулирует постоянный электрический ток $I_1 = 1$ мА. Вторичная обмотка криогенного компаратора постоянного тока, в котором в качестве нуль-индикатора магнитного потока используется многопетлевой радиочастотный сквид, состоит из $N_2 = 1$ витка. Ток I_2 , протекающий через эту обмотку и рабочий эталон (амперметр), регулируется генератором постоянного тока. Компаратор спроектирован так, что магнитные потоки $\Phi_1 = N_1 I_1$ и $\Phi_2 = N_2 I_2$, возникающие в его обмотках, направлены навстречу друг другу. Изменяя ток I_2 , по нуль-индикатору магнитного

потока можно добиться выполнения равенства $\Phi_1 = \Phi_2$. Тогда из $N_1 I_1 = N_2 I_2$ следует:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = \frac{1000}{1} 10^{-3} = 1 \text{ А,}$$

то есть рабочему эталону передается ровно единица силы постоянного электрического тока *ампер*.

5.2.6. Международная температурная шкала МТШ-90

Единица температуры по термодинамической шкале определяется как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды (температуры равновесия между твердой, жидкой фазами и паром). В 1968 г. для единицы температуры установлено название *кельвин* (К) вместо *градус Кельвина*. Воспроизведение единицы осуществляется в два этапа. На первом этапе с применением сосуда, аналогичного сосуду Дьюара, воспроизводится тройная точка воды со стандартной неопределенностью типа А, равной 0,2 мК. Следующий этап состоит в получении размера единицы, равного $1/273,16$ части температуры тройной точки воды. Для этого применяются установки, называемые газовыми термометрами. Принцип их действия состоит в следующем.

Температура идеального газа является параметром состояния и изменяется в соответствии с законом:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{m}{\mu} \cdot R,$$

где P , V и T — соответственно давление, объем и температура газа; R — молярная газовая постоянная; m — масса газа; μ — молярная масса. Если поместить баллон с газом в сосуд с температурой тройной точки воды, то можно зафиксировать параметры состояния газа (P , V , T). Затем сосуд помещается в термостат с другой температурой и измеряются либо давление при $V = \text{const}$, либо объем при $P = \text{const}$. По изменению давления или объема можно определить любую, отличную от тройной точки воды температуру.

На практике построение шкалы по газовому термометру представляет собой сложную и дорогостоящую процедуру. Это наиболее точные, но очень трудоемкие измерения, выполняемые лишь в немногих ведущих метрологических лабораториях мира. Основная сложность их состоит в учете несоответствия реального газа идеальному. Альтернативный подход основан на применении практических температурных шкал, основанных на реперных точках и интерполяционных термометрах.

В настоящее время действует максимально приближенная к термодинамической *международная практическая шкала МТШ-90*, принятая 17-й сессией Консультативного комитета по термометрии (ККТ) в 1989 г. и утвержденная МКМВ. Она охватывает область от 0,65 К до наивысшей температуры, практически доступной измерению в соответствии с современным уровнем развития науки и техники. Расхождение между МТШ-90 и термодинамической шкалой не превышает 1...3 мК. Принимая во внимание способ определения предшествующих температурных шкал (МТШ-68 и др.), сохранена

практика выражения температуры в виде разности ее значений относительно температуры 273,15 К — точки плавления льда. Выраженная таким образом термодинамическая температура T известна как температура Цельсия и определяется как

$$T/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15.$$

Единицей температуры Цельсия является *градус Цельсия* (символ $^{\circ}\text{C}$), размер которого равен *кельвину* по определению. Разность температур может быть выражена в *кельвинах* и *градусах Цельсия*.

МТШ-90 включает в себя несколько диапазонов. В диапазоне температур свыше 0°C реперными точками являются:

- тройная точка воды — 273,16 К ($0,01^{\circ}\text{C}$);
- температура плавления галлия — 302,9146 К ($29,7646^{\circ}\text{C}$);
- температура затвердевания индия — 429,7485 К ($156,5985^{\circ}\text{C}$);
- температура затвердевания олова — 505,078 К ($231,928^{\circ}\text{C}$);
- температура затвердевания цинка — 692,677 К ($419,527^{\circ}\text{C}$);
- температура затвердевания алюминия — 933,473 К ($660,323^{\circ}\text{C}$);
- температура затвердевания серебра — 1234,93 К ($961,78^{\circ}\text{C}$);
- температура затвердевания золота — 1337,33 К ($1064,18^{\circ}\text{C}$);
- температура затвердевания меди — 1357,77 К ($1084,62^{\circ}\text{C}$).

Под температурой плавления или затвердевания понимается температура равновесия жидкой и твердой фаз металла при давлении 101 325 Па. Интерполяция осуществляется при помощи платиновых термометров сопротивления. В диапазоне температур от 0 до $961,78^{\circ}\text{C}$ неопределенность типа А находится в пределах от 0,00005 до 0,002 К.

В диапазоне температур свыше $961,78^{\circ}\text{C}$ при воспроизведении единицы температуры применяется аппаратура, позволяющая измерять температуру тел по собственному тепловому излучению. Метрологические характеристики государственного первичного эталона в этом диапазоне:

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Неопределенность типа В, $^{\circ}\text{C}$	Неопределенность типа А, $^{\circ}\text{C}$
961,78	0,1	0,15
2500	0,3	1,4

В состав низкотемпературной части эталона (диапазон от 0,8 до 73,16 К) входят установки для воспроизведения температур реперных точек (тройные точки аргона, кислорода, неона, равновесного водорода), газовый интерполяционный термометр, железородиевые и платиновые термометры сопротивления, блоки сравнения. Неопределенность типа А здесь находится в пределах от 0,3 до 1,0 мК. Неопределенность типа В — в пределах от 0,4 до 1,5 мК.

5.3. Государственные первичные эталоны производных единиц

Для воспроизведения единицы производной физической величины государственному первичному эталону должна быть передана информация о размерах основных единиц. Она заимствуется из государственных схем передачи информации о размерах этих единиц. Таким образом, государственная схема передачи информации о размере единицы производной физической величины должна выглядеть так, как это показано на рис. 107. Однако в отечественной нормативно-

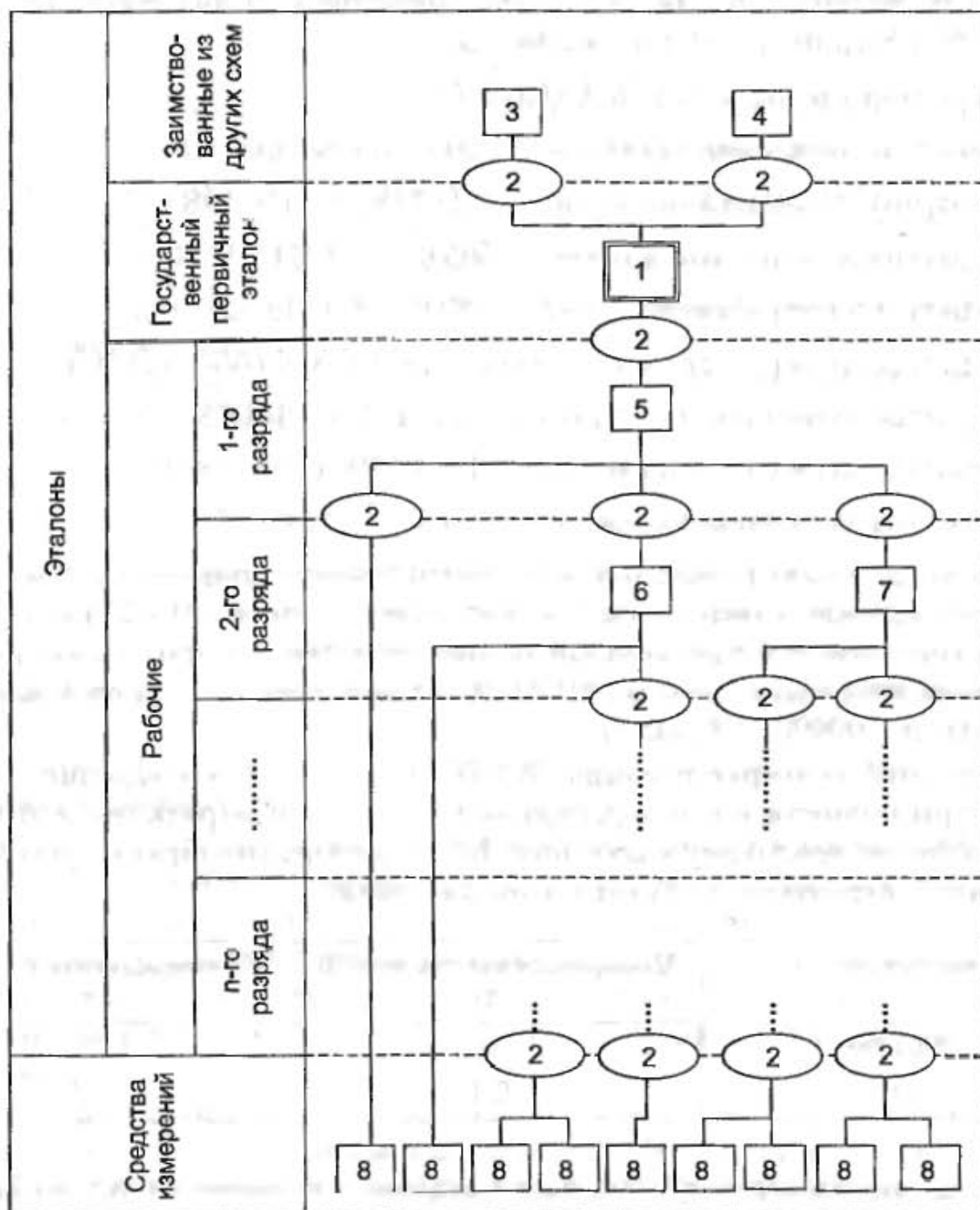


Рис. 107. Пример компоновки государственной схемы передачи информации о размере единицы производной физической величины:

- 1 — государственный первичный эталон; 2 — метод передачи информации;
 3, 4 — эталоны основных единиц, заимствованные из других государственных схем;
 5, 6, 7... — рабочие эталоны соответствующих разрядов; 8 — средства измерений

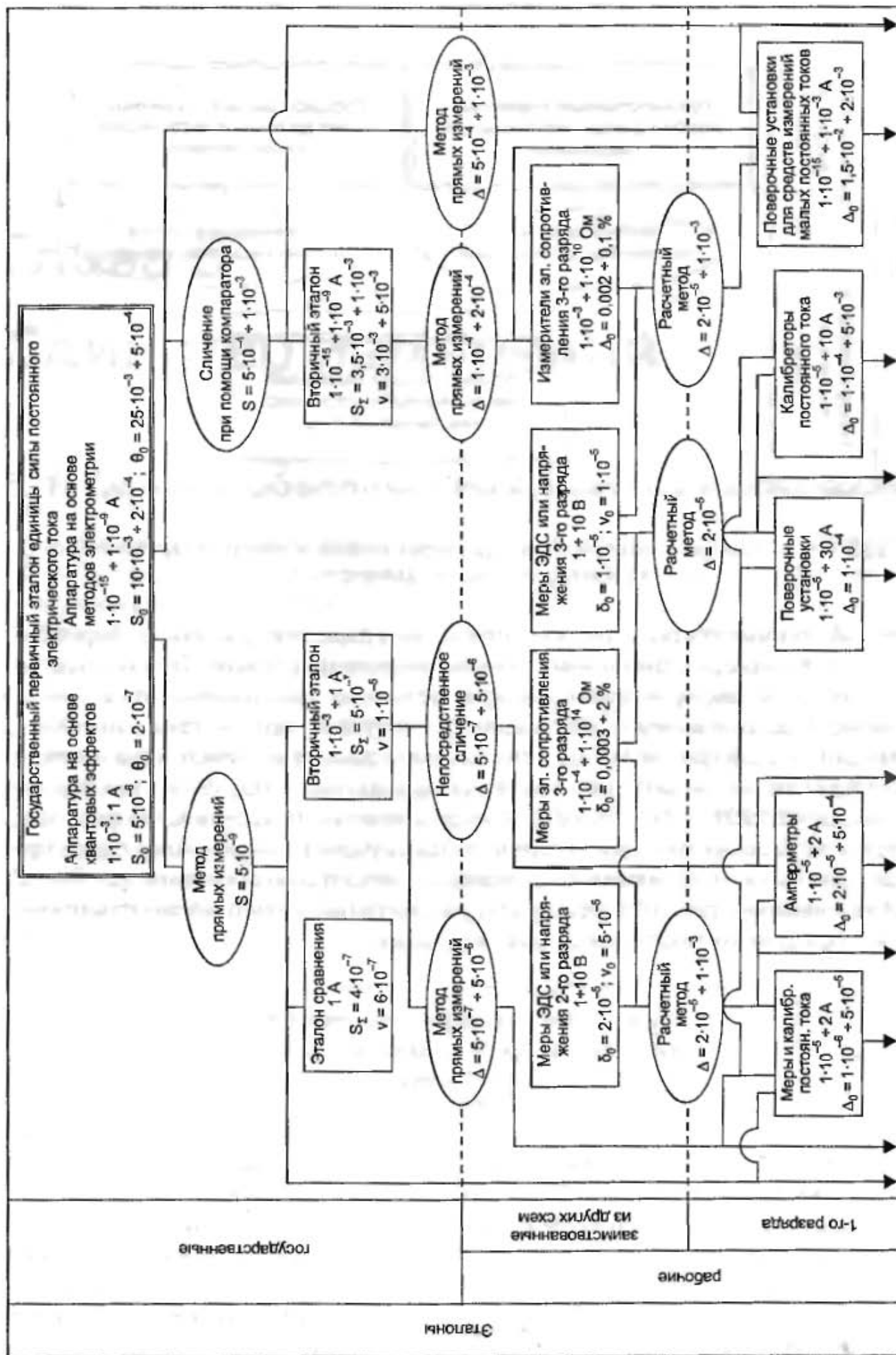


Рис. 108. Фрагмент государственной схемы передачи информации о размере единицы для средств измерений постоянного электрического тока по ГОСТ 8.022-91

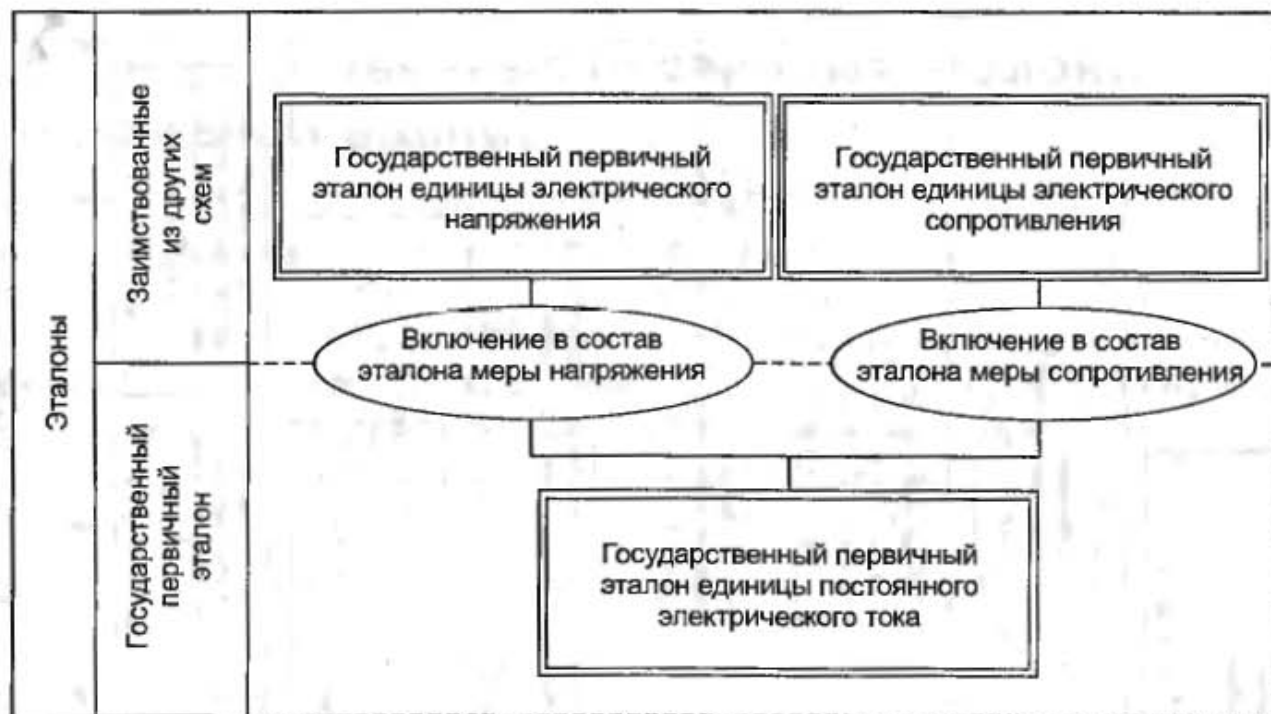


Рис. 109. Схема передачи информации о размерах *вольта* и *ома* государственному первичному эталону *ампера*

технической документации принято, чтобы государственную схему передачи информации о размере единицы возглавлял первичный эталон. Это относится к схемам передачи информации о размерах не только производных, но и основных единиц. Так, например, поле эталонов в государственной схеме передачи информации о размере единицы постоянного электрического тока *ампере* должно было бы выглядеть так, как показано на рис. 109, но во введенном в действие 01.07.1992 г. ГОСТ 8.022-91 верхнее поле, показанное на рис. 109, отсутствует. Фрагмент государственной схемы передачи информации о размере единицы для средств измерений постоянного электрического тока по ГОСТ 8.022-91 приведен на рис. 108. Это нужно рассматривать как особенность отечественной нормативно-технической документации.

Глава 6

Единство измерений

6.1. Основы обеспечения единства измерений

Под *единством измерений* понимается такое их состояние, при котором обеспечивается достоверность измерений, а значения измеряемых величин выражаются в узаконенных единицах.

Под *обеспечением единства измерений* понимается деятельность, направленная на установление и применение научных, технических, методических, правовых и организационных основ, правил, требований, норм и средств, необходимых для достижения заданного уровня единства измерений. Обеспечение единства измерений направлено на защиту прав и законных интересов граждан, установленного правопорядка и экономики Российской Федерации от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений. Если не обеспечивается единство измерений, то невозможны ни научная, ни производственная, ни хозяйственная деятельности, невозможны торговля, обмен информацией, международное сотрудничество, само существование и развитие цивилизации.

**Обеспечение единства измерений —
главная задача метрологической
деятельности.**

Решение этой задачи включает научное, техническое, методическое, нормативно-правовое и организационное обеспечение единства измерений.

Научной основой обеспечения единства измерений является наука об измерениях — **МЕТРОЛОГИЯ**. Один из ее разделов — **ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ** — служит *нормативно-правовой основой* обеспечения единства измерений. *Технической основой* обеспечения единства измерений служит система воспроизведения единиц SI и передачи информации об их размерах средствам измерений. *Методическую основу* обеспечения единства измерений образуют методики выполнения постоянных метрологических работ. *Организационную*

основу обеспечения единства измерений составляют государственные службы обеспечения единства измерений, метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и метрологические службы юридических лиц.

6.2. Техническая основа обеспечения единства измерений

6.2.1. Централизованное воспроизведение единиц

Под централизованным понимается такое воспроизведение единиц, при котором их размер воспроизводится в одном месте исходным эталоном, и информация о нем с помощью специальных технических средств передается средствам измерений. Международная система обеспечения единства измерений на основе централизованного воспроизведения единиц была заложена Метрической конвенцией, подписанной 20 мая 1875 г. в Париже на Международной дипломатической конференции по метру представителями 17 государств, в том числе Россией. Предыстория этого исторического события, в честь которого 20 мая каждого года отмечается теперь как Международный день метрологии, такова.

8 мая 1790 г. Учредительное собрание Франции приняло декрет о реформе мер и поручило Парижской академии наук разработать соответствующие предложения. Комиссия академии, руководимая Лагранжем, рекомендовала десятичное подразделение кратных и дольных единиц, а другая комиссия, в состав которой входил Лаплас, предложила принять в качестве единицы длины одну сорокамиллионную часть земного меридиана. На основе этой единственной единицы — *метра* — строилась вся система, получившая название *метрической*. За единицу площади принимался *квадратный метр*, за единицу объема — *кубический метр*, за единицу массы — *килограмм* — масса кубического дециметра чистой воды при температуре 4 °С. Главная единица — *метр* — была связана с размерами Земли, и в этом отношении была как бы общей для всех ее обитателей. Считалось, что неизменность размеров Земли гарантирует неизменность *метра*.

26 марта 1791 г. Учредительное собрание Франции утвердило предложения Парижской академии наук. Национальный Конвент признавал, что дело реформы мер и весов «как одно из величайших благодеяний революции, должно быть доведено республикой до конца». 7 апреля 1795 г. Конвент принял закон о введении метрической системы во Франции и поручил комиссарам, в число которых входили Кулон, Мешен, Дсламбр, Лагранж, Лаплас и другие видные ученые, выполнить работы по экспериментальному определению единиц длины и массы. С этой целью под наблюдением международной комиссии были проведены обширные астрономо-геодезические исследования, на основании которых Ленуар изготовил платиновую концевую меру длины в виде стержня прямоугольного сечения, воспроизводившую *метр* по результатам градусных измерений с относительной погрешностью $\sim 1 \cdot 10^{-4}$. Законом от 10 декабря 1799 г. платиновые *метр* и *килограмм*, имевший цилиндрическую форму, были утверждены в качестве основных единиц метрической системы. Их сдали на хранение в Ар-

хив Франции. Тем же законом была учреждена медаль с надписью: «На все времена, для всех народов».

Однако почти сразу обнаружили расхождения результатов геодезических измерений в разных странах. Градусные измерения давали разные результаты из-за погрешностей измерений, различия применявшихся мер длины и неправильной формы Земли. Недостаточная точность воспроизведения метра при градусных измерениях (каждое измерение давало новое значение) приводила к относительной погрешности, достигавшей $2 \cdot 10^{-4}$. Согласно общей теории измерений (см. ч. I), это можно интерпретировать как следствие третьей аксиомы метрологии.

В 1869 г. Петербургская академия наук направила в Парижскую академию наук доклад, составленный академиками Б. С. Якоби, Г. И. Вильдом и О. В. Струве, в котором они предлагали отказаться от «естественного» определения основных единиц через размеры Земли и для обеспечения международного единства измерений изготовить одновременно из одного и того же материала меры одинаковой конструкции в качестве национальных эталонов государств, чтобы исключить расхождения, неизбежные при индивидуальном изготовлении их в каждой стране. Единицей длины предлагалось сделать *международный прототип*, выполнив его в виде штриховой меры длины, так как к этому времени появились более точные средства измерений длины таких мер благодаря усовершенствованию окулярного микрометра первым ученым хранителем Депо образцовых мер и весов в Санкт-Петербурге академиком А. Я. Купфером.

В 1872 г. комиссия из представителей разных государств, созданная по инициативе русских ученых с целью подготовки Метрической конвенции, решила для преемственности и сохранения размера единицы длины изготовить *международный прототип*, равный *архивному метру*. Это удалось сделать с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-6}$, т. е. точнее, чем воспроизводился сам *архивный метр*. Работы по изготовлению и тщательному исследованию *прототипов метра и килограмма* продолжались в течение многих лет и были завершены к 1889 г.

В соответствии с Метрической конвенцией в качестве первичных эталонов *метра и килограмма* признавались изготовленные в 1799 г. образцы, хранившиеся в Архиве Франции (*архивный метр* в виде концевой меры — платинового стержня прямоугольного сечения и *архивный килограмм* в виде платинового цилиндра). По решению Метрической конвенции в созданном специально для этого научном учреждении — Международном бюро мер и весов в г. Севр (недалеко от Парижа) изготовили 34 вторичных эталона (прототипа) *метра* и 43 вторичных эталона (прототипа) *килограмма*, размеры которых совпадали с архивными образцами.

Вторичные эталоны *метра* представляли собой бруски из платино-иридиевого сплава (90 % платины и 10 % иридия) с поперечным сечением в форме буквы X, вписанной в квадрат со стороной 20 мм (рис. 110).

С двух сторон каждого бруска на отполированных участках были нанесены по три штриха на расстоянии 0,5 мм друг от друга. Перпендикулярно к ним вдоль оси бруска нанесены два штриха с расстоянием между ними 0,2 мм. Поверхности, на которые нанесены штрихи, совпадают с нейтральной плоскостью

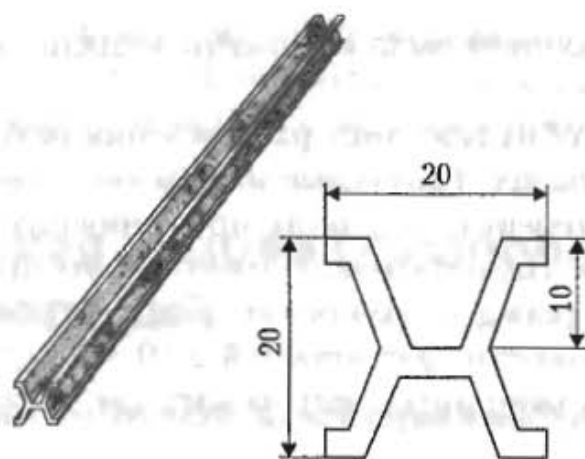


Рис. 110. Платино-иридиевый прототип метра

бруска. Х-образная форма оказывает большое сопротивление прогибу, поэтому изменение расстояния между штрихами, расположенными в нейтральной плоскости, при возможном изгибе бруска оказывается минимальным. Метр был принят равным расстоянию между серединами средних штрихов при температуре тающего льда.

Образец метра № 6 на I Генеральной конференции по мерам и весам, собравшейся в Париже в 1889 г., был признан *международным прототипом метра*, обозначен готической буквой *m* и оставлен на хранение в Международном бюро мер и весов. Точно так же один из 43 образцов *килограмма*, представлявших собой платино-иридиевые цилиндры, высота и диаметр которых были равны 39 мм, I Генеральной конференцией по мерам и весам был признан *международным прототипом килограмма* и тоже оставлен на хранение в Международном бюро мер и весов. Остальные образцы *метра* и *килограмма* распределили по жребию между странами, подписавшими Метрическую конвенцию. России достались два эталона *метра* (№ 11 и № 28) и два эталона *килограмма* (№ 12 — см. рис. 104, и № 26). Они хранятся в Санкт-Петербурге во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева (бывшей Главной палате мер и весов).

В 1918 г. при введении метрической системы в РСФСР *эталон метра* № 28 и *эталон килограмма* № 12 были признаны в качестве *государственных первичных эталонов*, от которых информация о размерах единиц передавалась средствам измерений.

Похожая картина наблюдалась с воспроизведением и других физических величин. Так, например, единица времени *секунда* до 1960 г. определялась как $1/86\,400$ часть средних солнечных суток (среднего значения суток в течение года), т. е. была связана с мировой физической константой планетарного масштаба — периодом обращения Земли вокруг своей оси. Стандартное отклонение этой случайной величины составляло 10^{-7} с. Период обращения Земли вокруг Солнца более стабилен, чем вокруг оси. Поэтому с 1960 по 1967 гг. за *секунду* принималась $1/31\,556\,925,9747$ часть тропического года — промежутка времени между двумя последовательными прохождением Солнцем точки весеннего равноденствия. Продолжительность тропического года не постоянна, поэтому для расчетов был выбран конкретный 1900 г. Стандартное отклонение *секунды* при воспроизведении по новому определению уменьшилось до 10^{-10} с.

Стремление к еще большему повышению точности воспроизведения *секунды* побудило XIII Генеральную конференцию по мерам и весам принять в 1967 г. современное ее определение, стандартное отклонение при котором составляет 10^{-14} с. Размер *секунды* (как и размер *метра* при переходе к международному прототипу) решено было не менять, чем и объясняется цифра 9 192 631 770 (см. п. 5.2.1), связывающая события атомарного и планетарного масштабов.

Тенденция к переходу от констант макромира к явлениям на атомарном уровне с целью повышения точности воспроизведения единиц затронула и определение *метра*. В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение *метра* как длины, равной 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между невозмущенными энергетическими уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86. Предполагалось, что это позволит воспроизводить *метр* с относительной погрешностью не более $1 \cdot 10^{-8}$. Исследования, выполненные впоследствии в разных национальных лабораториях и Международном бюро мер и весов, показали, что фактически она составляет $4 \cdot 10^{-9}$. Современное определение *метра* как длины пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ секунды, обеспечивает воспроизведение единицы длины с относительной погрешностью $2 \cdot 10^{-11}$.

Система централизованного воспроизведения единиц эталонами и передачи информации об их размерах средствам измерений стала технической основой обеспечения единства измерений в нашей стране. В настоящее время (по состоянию на 1 января 2010 г.) эталонная база России насчитывает 128 государственных первичных и специальных эталонов, причем число их продолжает увеличиваться. Каждому такому эталону соответствует государственная схема передачи информации о размере единицы, в состав которой входят вторичные (в том числе рабочие) эталоны, общее количество которых исчисляется десятками тысяч. Обслуживанием этой техники занимаются государственная метрологическая служба, метрологические службы федеральных органов исполнительной власти, метрологические службы юридических лиц и индивидуальные предприниматели. Экономические затраты на содержание всего этого хозяйства несоразмерно велики и по мере увеличения числа государственных эталонов продолжают возрастать. Становится все более и более очевидной бесперспективность такого способа обеспечения единства измерений.

Выход из положения видится в постепенном переходе к децентрализованному воспроизведению единиц на основе использования фундаментальных физических констант и достижений квантовой метрологии.

6.2.2. Квантовая метрология

В начале XX в. немецкий физик М. Планк показал, что основные единицы для нашей Вселенной, однозначно предопределенные наиболее общими законами физики, могут быть составлены из фундаментальных физических констант: скорости света c , постоянной Планка \hbar и гравитационной постоянной γ . Значения этих констант, фигурирующих в виде коэффициентов в уравнениях основных физических теорий — классической и квантовой электродинамике и общей

теории относительности — являются максимально стабильными и не зависящими от внешних условий. Однако планковские единицы длины, времени и массы

$$l = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \hbar}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ см}, t = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \hbar}{c^5}} \approx 5 \cdot 10^{-44} \text{ с}, m = \sqrt{\frac{\hbar \cdot c}{\gamma}} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ г}$$

лежат очень далеко от используемых на практике диапазонов. Кроме того, значение гравитационной постоянной до сих пор известно с недостаточной точностью (это же в меньшей мере относится и к \hbar). Но самым главным недостатком планковских единиц является то, что мы не располагаем реальными физическими процессами, в которых бы они воспроизводились. В частности, науке пока не известны объекты, которые имели бы в точности планковскую массу, планковские размеры или длились бы планковское время. Именно поэтому планковские единицы, несмотря на их универсальность, в метрологии в настоящее время не используются.

Реальная возможность создания универсальной системы естественных мер появилась после открытия так называемых *макроскопических проявлений квантовых эффектов*: сверхпроводимости, сверхтекучести, квантового эффекта Холла. В этих эффектах в результате когерентного поведения огромного числа микрочастиц происходит квантование строго определенными порциями той или иной макроскопической величины. Рассмотрим, в частности, *эффект Джозефсона*, который возникает в контактах двух сверхпроводников, разделенных тонким слоем материала с большим электрическим сопротивлением.

Как известно, электроны в вакууме отталкиваются друг от друга по закону Кулона. В твердом теле, помимо электронов, имеются положительно заряженные ионы решетки. Притягиваясь к электронам, они экранируют их заряд. В некоторых веществах при достаточно низких температурах суммарное взаимодействие электронов может соответствовать слабому притяжению. В этом случае электроны объединяются в так называемые *куперовские пары*. Такие пары, в отличие от отдельных электронов, имеют нулевой спин (т. е. подчиняются статистике Бозе). Это позволяет большому числу пар скапливаться в одном и том же квантовом состоянии. Если средняя скорость куперовских пар отлична от нуля, т. е. существует незатухающий электрический ток, то говорят, что имеет место явление *сверхпроводимости*.



Рис. 111. Схематическое изображение джозефсоновского перехода

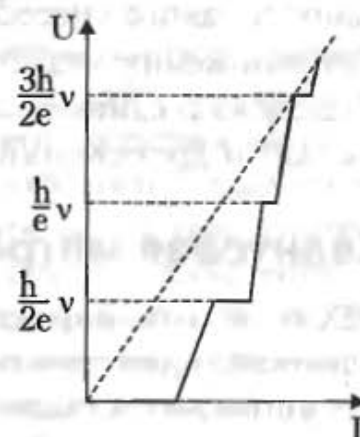


Рис. 112. Вольт-амперная характеристика джозефсоновского перехода

Предположим теперь, что два сверхпроводника разделены очень тонкой пленкой материала с большим электрическим сопротивлением (рис. 111). Куперовские пары могут просачиваться (туннелировать) через этот тонкий слой из одного сверхпроводника в другой. При этом если фазы волновых функций пар в двух сверхпроводниках окажутся различными, то через переход Джозефсона будет течь ток в отсутствие разности потенциалов (нижняя ступенька на рис. 112). Такое явление получило название *стационарного эффекта Джозефсона*.

Если приложить к двум сторонам джозефсоновского перехода разность потенциалов U , то при туннелировании куперовской пары из одного сверхпроводника в другой избыток ее энергии $2eU$ будет излучаться в виде квантов электромагнитной энергии — фотонов. Частота ν_0 этих квантов определяется законом сохранения энергии:

$$h\nu_0 = 2eU,$$

то есть повышается с увеличением U . Это явление называется *нестационарным эффектом Джозефсона*.

Если теперь облучать джозефсоновский переход электромагнитным излучением сверхвысокой частоты ν , то при совпадении этой частоты с характерной для данного напряжения U частотой собственного излучения ν_0 в результате резонансного взаимодействия произойдет захват частоты ν_0 , и излучающая система перейдет в режим вынужденных колебаний с частотой ν . В этом режиме усиление тока, пропускаемого через джозефсоновский переход, не будет сопровождаться увеличением падения напряжения на нем, так как энергия излучаемых квантов $h\nu = 2eU$ будет оставаться постоянной.

Такой же резонанс наступает при $\nu = \nu_0/n$, где n — любое целое число, т. е. на гармониках соответствующим образом подобранного сигнала СВЧ. В результате на вольтамперной характеристике перехода появляются особенности (см. рис. 112) в виде ступенек при напряжениях

$$U = n \frac{h}{2e} \nu.$$

Заряд электрона e является такой же фундаментальной физической константой, как и упоминавшиеся выше h , c , γ . Величина $h/2e$ называется *квантом магнитного потока*, значение которого определяется с большей точностью, чем значения h и e по отдельности. Поскольку частота в настоящее время является наиболее точно измеряемой величиной (числовое значение стандартного отклонения не превышает 10^{-14}), точность воспроизведения напряжения с помощью эффекта Джозефсона ограничивается точностью значения $h/2e$. Стандартное отклонение при воспроизведении U составляет в настоящее время $\sim 10^{-8}$ В.

На использовании эффекта Джозефсона основаны эталоны единицы напряжения — *вольта* во всех промышленно развитых странах с начала 1980-х гг. В состав эталона обычно входит дискретный переход, возбуждаемый СВЧ-излучением на частоте 10...100 ГГц. Значение квантованного напряжения составляет при этом $U = 20...200$ мкВ. Столь низкое значение воспроизводимого напряжения вынуждает включать в состав эталона масштабные преобразователи

напряжения различной конструкции и нормальные элементы, приводящие к потере точности. В связи с этим в последнее время были созданы интегральные схемы, включающие в себя несколько тысяч соединенных последовательно переходов Джозефсона и позволяющие воспроизводить напряжение, равное 1 В и выше.



Рис. 113. Интегральная схема с последовательным соединением джозефсоновских переходов, позволяющая получать при облучении электромагнитным полем с частотой 70 ГГц напряжение 140 мкВ на одной ступени и 1 В на 7000 ступенях

Из общефизических соображений и проведенных экспериментов следует, что стабильность эталонов на основе эффекта Джозефсона может достигать $\sim 10^{16}$, что открывает широкие перспективы для совершенствования естественного эталона *вольта*.

Не менее интересные возможности для метрологии дает открытый в 1980 г. фон Клитцингом *квантовый эффект Холла*. Суть его состоит в том, что в специальных структурах типа металл–диэлектрик–полупроводник при температуре жидкого гелия и в сильном магнитном поле электрическое сопротивление принимает строго фиксированные дискретные значения

$$R_H = \frac{h}{e^2 n} = \frac{\mu_0 c}{2n\alpha},$$

где μ_0 — магнитная постоянная вакуума; $\alpha = \mu_0 c e^2 / 2h$ — постоянная тонкой структуры.

Рассмотрим схему наблюдения квантового эффекта Холла (рис. 114). Пусть на металлическую пластину подается положительное напряжение U_B . Тогда часть электронов из кремниевого полупроводника Si подтянется к границе диэлектрика SiO_2 и окажется заключенной в тонком слое — канале, ограниченном на рис. 114, *a* пунктирной линией. Действительно, диэлектрик SiO_2 для электронов непроницаем, а обратно в полупроводник Si им не дает вернуться притяжение к металлической пластине.

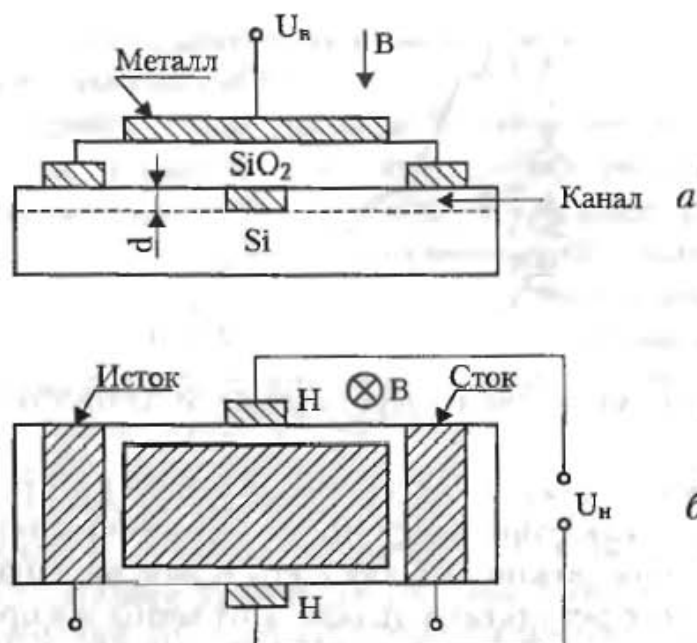


Рис. 114. Холловская структура типа металл–диэлектрик–полупроводник

Запертые в канале толщиной d электроны, согласно квантовой механике, будут занимать наинизший из возможных дискретных энергетических уровней, соответствующих движению поперек слоя, а их волновые функции будут размазаны по толщине канала. Такие электроны различаются между собой величиной и направлением импульса в плоскости канала, т. е. становятся как бы двумерными.

Если подать некоторое напряжение на электроды «исток» — «сток» (см. рис. 114, б), то между ними потечет ток I . Если, кроме того, приложить магнитное поле B , перпендикулярное плоскости канала, то электроны, изгибая свои траектории в поле B , начнут скапливаться у боковых краев структуры, пока возникшая разность потенциалов U_H между холловскими контактами H не воспрепятствует их дальнейшему накоплению. Это *классический эффект Холла*, характеризуемый холловским сопротивлением $R_H = U_H/I$. Как показано в курсе общей физики, величина R_H обратно пропорциональна плотности электронов в канале.

Существенно новая ситуация возникает при учете квантового характера движения электронов в магнитном поле. Согласно квантовой механике, энергия их движения в плоскости слоя может принимать только дискретные значения:

$$E_n = (n + 1/2)h\omega_c/m_e c,$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$. Таким образом, движение электрона оказывается квантованным по всем трем координатам. Следствием этого является наличие на зависимости R_H от плотности электронов в слое ρ_e плоских участков — плато (рис. 115) с квантованными значениями R_H , согласно формуле для R_H , приведенной выше. На практике величину ρ_e регулируют, изменяя U_B .

Качественное объяснение данного явления, открытого фон Клитцингом в 1980 г. и названного *квантовым эффектом Холла*, связано с наличием в слое примесей. Расчет показывает, что в некотором диапазоне увеличения концентрации электронов ρ_e добавочные электроны оказываются связанными около примесей и не дают вклада в ток. На графике зависимости R_H от ρ_e именно этим диапазонам и соответствуют плато. Например, при $n = 4$ холловское сопротивление составляет 6453,2 Ом и имеет воспроизводимость 10^8 .

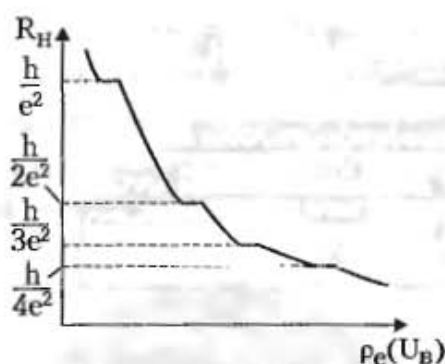


Рис. 115. Зависимость холловского сопротивления от плотности электронов в слое

В настоящее время строгая количественная теория квантового эффекта Холла еще не создана, и неизвестно, каких предельных точностей воспроизведения единицы сопротивления можно достичь с его помощью. Однако уже полученные экспериментальные результаты делают этот метод воспроизведения сопротивления предпочтительным по сравнению с другими, и во всех развитых странах, в том числе в России, ведутся активные работы по совершенствованию квантовых эталонов сопротивления.

Сравнительно недавно японскими физиками открыт новый макроскопический квантовый эффект, возникающий на одном джозефсоновском переходе малой емкости или на гранулярной сверхпроводящей пленке, в которой образуется решетка таких переходов. Облучение такого образца электромагнитными колебаниями с частотой ν приводит к появлению резонансных пиков на его вольтамперной характеристике, что означает квантование постоянного тока, проходящего через образец, согласно соотношению

$$I = \frac{k}{n} 2e\nu,$$

где k , n — целые числа. На основании этого эффекта после его детального исследования можно будет, по-видимому, создать новый естественный эталон единицы силы постоянного электрического тока.

Что же принципиально нового вносят в метрологию эталоны, основанные на макроскопических квантовых эффектах? Во-первых, это подлинно естественные эталоны. При выполнении определенных условий, которые можно строго фиксировать (тип и качество структуры, температура, магнитное поле и т. д.), они воспроизводят единицы, размеры которых выражаются через значения фундаментальных физических констант, общие для всей Вселенной. Во-вторых, широкое их применение открывает возможность децентрализованного воспроизведения единиц и упразднения неэффективной и дорогостоящей системы передачи информации об их размерах средствам измерений.

Из сказанного следует важность определения точного значения фундаментальных физических констант. Работы в этом направлении ведутся многими лабораториями мира. Международная организация КОДАТА (Комитет по численным данным для науки и техники) проводит математическую обработку и согласование получаемых данных. Рекомендованные значения фундаментальных констант публикуются для использования всеми специалистами, имеющими дело с точными измерениями. В табл. 13 приведены значения наиболее

часто встречающихся фундаментальных физических констант и их комбинаций по результатам согласования 2006 г.

Приведенное в первой строчке таблицы значение скорости света постулировано как точное и используется при определении размера единицы длины в едином эталоне времени, частоты и длины. В сентябре 1988 г. в Париже состоялось заседание Международного консультативного комитета по электричеству, на котором было принято решение постулировать как точное и значение постоянной Джозефсона $2e/h = 483\,597,9$ ГГц/В. Благодаря этому соглашению точность поддержания размера единицы напряжения с помощью эффекта Джозефсона может быть значительно повышена.

Из всех естественных квантовых эталонов пока один лишь эталон *ома* воспроизводит размер единицы, который выражается исключительно через значения фундаментальных физических констант. Размеры единиц, воспроизводимые другими естественными эталонами (*вольта, ампера, метра*), выражаются не только через значения фундаментальных физических констант, но и через единицу частоты, размер которой должен воспроизводиться независимо. Вычислить его через значения фундаментальных физических констант невозможно, так как в едином эталоне единиц времени, частоты и длины атомы цезия-133 являются сложными многоэлементными системами, и решение уравнений квантовой теории, из которых определяется частота их квантовых переходов, не под силу даже самым мощным ЭВМ. Между тем в идеале система естественных эталонов должна быть такой, чтобы размеры всех воспроизводимых единиц выражались только через значения фундаментальных физических констант. Это возможно, если взять, например, в качестве эталонной частоту двухфотонного оптического перехода $1s-2s$ в водороде, измеряемую методами бездоплеровской лазерной спектроскопии. Стандартное отклонение частоты этого перехода, вычисляемой через значения фундаментальных физических констант, не превышает 10^{-12} Гц.

Таблица 13

Величина	Обозначение	Значение	Единица	Относительное стандартное отклонение
Скорость света в вакууме	c	299 792 458	м · с ⁻¹	Точно
Гравитационная постоянная	γ	$6,673(10) \cdot 10^{-11}$	м ³ · кг ⁻¹ · с ⁻²	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Постоянная Планка	h	$6,62606896(33) \cdot 10^{-34}$	Дж · с	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Постоянная Планка, деленная на 2π	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1,054571628(53) \cdot 10^{-34}$	Дж · с	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Заряд электрона	e	$1,602176487(40) \cdot 10^{-19}$	Кл	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Квант магнитного потока	h/2e	$2,067833636(81) \cdot 10^{-15}$	Вб	$3,9 \cdot 10^{-8}$

продолжение ↗

Таблица 13 (продолжение)

Величина	Обозначение	Значение	Единица	Относительное стандартное отклонение
Масса электрона	m_e	$9,10938215(45) \cdot 10^{-31}$	кг	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Постоянная тонкой структуры	α	$7,2973525376(50) \cdot 10^{-3}$	—	$6,8 \cdot 10^{-10}$
Постоянная Джозефсона	$2e/h$	$483597,891(12) \cdot 10^9$	Гц/В	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Постоянная фон Клитцинга	h/e^2	25812,807557(18)	Ом	$6,8 \cdot 10^{-10}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02214179(30) \cdot 10^{23}$	моль ⁻¹	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Постоянная Больцмана	k	$1,3806504(24) \cdot 10^{-23}$	Дж/К	$1,7 \cdot 10^{-6}$
Атомная единица массы	u	$1,660538782(83) \cdot 10^{-27}$	кг	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Молярная постоянная	M_u	$1 \cdot 10^{-3}$	кг/моль	Точно
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} =$ $= 12,566370612 \cdot 10^{-7}$	Ф/м	Точно
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$	Гн/м	Точно

Наибольшую трудность представляет создание естественного эталона единицы массы. Природный масштаб этой единицы, как уже отмечалось, задается массой микрообъектов (например, атомов). Он очень мал, а переход к массе макрообъектов осуществляется с помощью фундаментальной физической константы — числа Авогадро, значение которой известно не настолько точно, чтобы обеспечить воспроизведение единицы массы — килограмма — со стандартным отклонением порядка 10^{-8} кг. Эта проблема ждет своего решения.

6.2.3. Децентрализованное воспроизведение единиц

Когда в 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра как длины, равной 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86, это не только позволило повысить точность его воспроизведения по сравнению с платино-иридиевым прототипом более чем в 10 раз, но и открыло возможность автономного воспроизведения единицы длины в национальных метрологических лабораториях и институтах, т. е. децентрализованно. Эта возможность осталась и после определения метра как длины пути, проходимого светом в вакууме за промежуток времени, равный $1/c$, где $c = 299\,792\,458$ м/с — постулированное значение скорости света, принятое XVII Генеральной конференцией по мерам и весам в 1983 г.

Точно такая же возможность децентрализованного воспроизведения единицы времени *секунды* появилась в 1967 г. после определения ее XIII Генеральной конференцией по мерам и весам как промежутка времени, равного 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

XVIII сессией Международного комитета по мерам и весам была принята рекомендация о переходе с 1 января 1990 г. на независимое воспроизведение *ома* и *вольта* эталонами, основанными на использовании квантовых эффектов Холла и Джозефсона, во всех странах мира, подписавших Метрическую конвенцию.

В целом эволюция идеи воспроизведения единиц физических величин эталонами выглядит так, как это показано на рис. 116.

Под децентрализованным понимается такое воспроизведение единиц, при котором их размер не получается в результате передачи информации о нем от вышестоящих в метрологической иерархии эталонов, а воспроизводится независимо исходным эталоном или непосредственно в средствах измерений.

В настоящее время все единицы физических величин, кроме *килограмма*, в мировом масштабе воспроизводятся децентрализованно.

При этом существует опасность существенного расхождения между размерами единиц, воспроизводимыми национальными эталонами. Поэтому в международной практике для обеспечения единства измерений создан механизм, называемый *ключевыми сличениями*.

Ключевые сличения заключаются в измерении всеми их участниками значения физической величины, хранимого эталоном сравнения или другой высокостабильной мерой, и сравнения результатов этих измерений. Ключевые сличения Международного комитета по мерам и весам проводятся его консультативными комитетами по видам измерений. Последние на своих заседаниях изучают потребность в сличениях и решают, какие сличения надо инициировать. К участию в ключевых сличениях Международного комитета по мерам и весам приглашаются хранители национальных эталонов: национальные метрологические институты (или лаборатории) — участники консультативных комитетов и другие лаборатории, *обладающие наивысшей технической компетенцией и опытом в данном виде измерений*. Для организации и проведения сличений назначается *пилотная лаборатория* и 2–3 лаборатории ей в помощь. Эти лаборатории составляют подробный технический протокол (техническое руководство, которое детально описывает методику проведения сличений) и график работ. Затем пилотная лаборатория подготавливает и исследует эталон сравнения и организует его отправку участникам сличений в соответствии с утвержденным графиком. Лаборатории — участники сличения независимо друг от друга и в строгом соответствии с техническим протоколом проводят измерения присланной им меры и на основании выполненных измерений определяют значение этой меры и его неопределенность. Полученные результаты вместе с необходимой

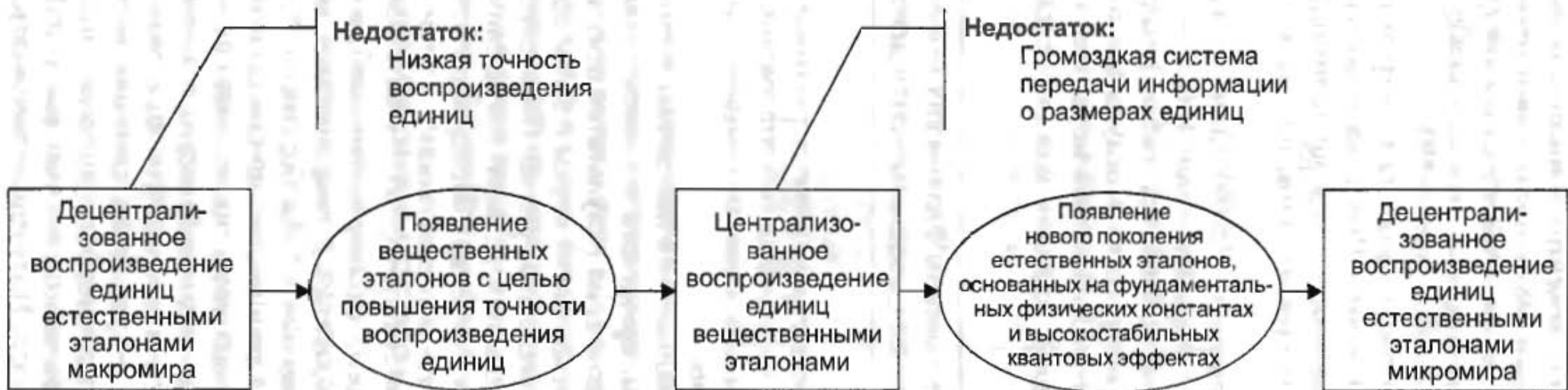


Рис. 116. Эволюция идеи воспроизведения единиц физических величин эталонами

дополнительной информацией направляются в пилотную лабораторию, которая анализирует, обрабатывает все полученные материалы и определяет *опорное значение* сличений и его *расширенную неопределенность*.

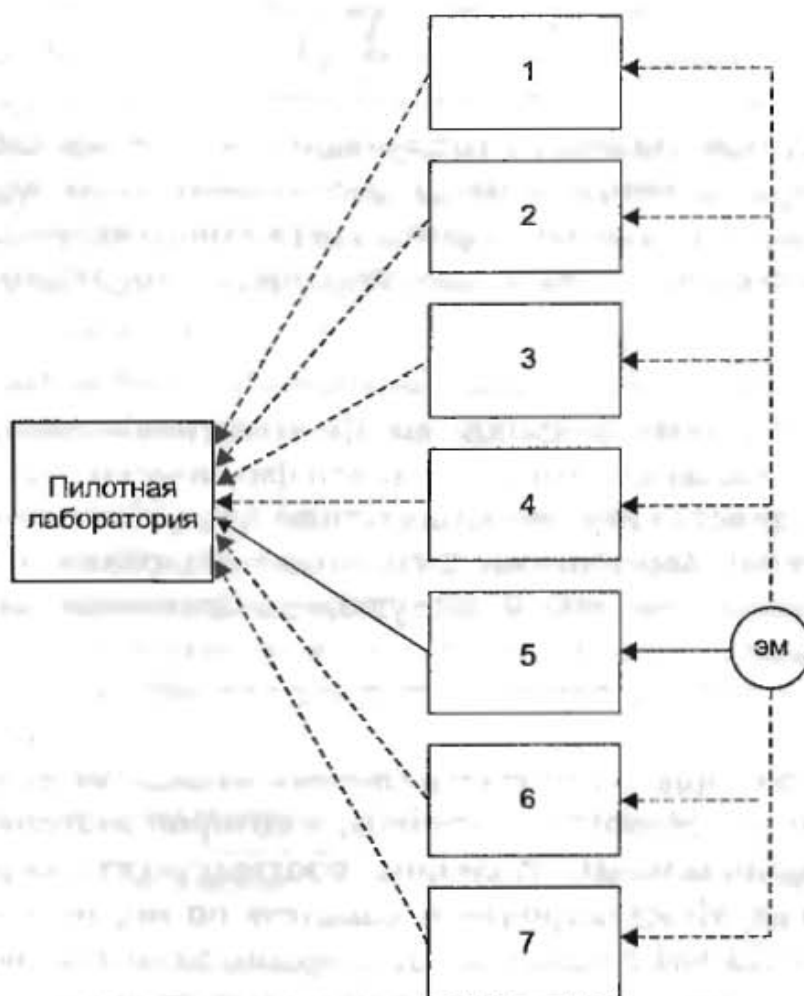


Рис. 117. Схема ключевых сличений: ЭМ — эталонная мера; 1–7 — национальные метрологические институты (лаборатории)

Ключевые сличения являются примером *многократного измерения с неравноточными значениями отсчета* (см. ч. I, п. 6.2.2). Опорное значение представляет собой *среднее взвешенное*

$$\hat{Q}_{\text{МКМВ}} = \sum_{i=1}^n g_i \hat{Q}_i,$$

где \hat{Q}_i — результат многократного измерения эталонной меры с помощью i -го национального эталона;

$$g_i = \frac{1}{u_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i^2} \quad \text{— «вес» результата измерения } \hat{Q}_i;$$

u_i — стандартная неопределенность этого результата измерения;

n — число участников ключевых сличений.

Стандартная неопределенность опорного значения при независимых \hat{Q}_i

$$u_{\hat{Q}_{\text{МКМВ}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i^2}}$$

Если национальные эталоны, участвующие в ключевых сличениях Международного комитета по мерам и весам, рассматривать как единый групповой эталон, утвержденный в качестве мирового первичного эталона, то опорное значение будет значением единицы, воспроизводимой этим эталоном. Таким образом,

при очевидной децентрализации воспроизведения единиц в мировом масштабе с помощью ключевых сличений фактически реализуется идея обеспечения единства измерений на основе централизованного воспроизведения единиц первичными групповыми эталонами, в состав которых национальные эталоны, участвующие в сличениях, входят в качестве вторичных.

По опорному значению оценивается *степень эквивалентности национальных эталонов*, под которой понимается *степень, с которой значение единицы, воспроизводимой национальным эталоном, соответствует опорному значению ключевых сличений Международного комитета по мерам и весам*. Количественно она выражается как отклонение от опорного значения (*погрешность*) значения единицы, воспроизводимого национальным эталоном,

$$d_i = \hat{Q}_i - \hat{Q}_{\text{МКМВ}}$$

в совокупности со стандартной неопределенностью этого отклонения

$$u_{d_i} = \sqrt{u_{\hat{Q}_i}^2 + u_{\hat{Q}_{\text{МКМВ}}}^2 - 2u_{\hat{Q}_i, \hat{Q}_{\text{МКМВ}}}}$$

где $u_{\hat{Q}_i, \hat{Q}_{\text{МКМВ}}}$ – ковариация значения \hat{Q}_i и опорного значения $\hat{Q}_{\text{МКМВ}}$.

Национальные метрологические институты (лаборатории) публикуют заявления о своих измерительных возможностях, которые содержат сведения о точности их национальных эталонов. Они вводятся в базу данных Международного бюро мер и весов и публикуются в Интернете на сайте этой международной организации. Заявленная точность национального эталона подтверждается при сличениях с вероятностью 0,95, если выполняется условие

$$|d_i| < 2u_{d_i}. \quad (22)$$

В противном случае считается, что заявленная точность национального эталона не подтверждается сличениями. Тем самым не выполняется *обязательное усло-*

ние международного признания сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых данным национальным метрологическим институтом (лабораторией), зафиксированное в «Договоренности о взаимном признании национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений», открытым для подписания Международным комитетом по мерам и весам 14 октября 1999 г. Для директоров национальных метрологических институтов, подписавших эту договоренность, и страны в целом это может иметь серьезные последствия, поскольку отказ в признании сертификатов калибровки и измерений в каком-либо виде измерений автоматически приводит к правовой несостоятельности сертификатов соответствия результатов всех измерений этого вида в стране. Чтобы не допустить этого иногда приходится занижать точность национального эталона и публиковать информацию об его измерительных возможностях с увеличенной оценкой неопределенности результата воспроизведения единицы u_{d_i} .

Следующим шагом на пути обеспечения единства измерений в мире при децентрализованном воспроизведении единиц национальными эталонами является распространение метрологической эквивалентности на национальные эталоны стран, представленных в региональных метрологических организациях. Список последних приведен в табл. 14. Для этого вновь используется механизм ключевых сличений.

Таблица 14. Региональные метрологические организации

Наименование	Обозначение	
	английское	русское
Азиатско-тихоокеанская программа	APMP	АПИМП
Евразийское сотрудничество национальных метрологических институтов	COOMET	КООМЕТ
Европейская ассоциация национальных метрологических институтов	EURAMET	ЕВРАМЕТ
Межамериканская метрологическая система	SIM	СИМ
Южноафриканское сообщество развития сотрудничества и неопределенности измерений	SADCMET	САДКМЕТ

К участию в ключевых сличениях приглашаются все национальные метрологические институты (лаборатории), представленные в региональных метрологических организациях и не принимающие участия в ключевых сличениях Международного комитета по мерам и весам. Кроме того, приглашаются один или несколько национальных метрологических институтов, принимавших участие в ключевых сличениях Международного комитета по мерам и весам. Они называются *связующими организациями*. Связующие организации не подтверждают эквивалентность своих эталонов в ключевых сличениях региональных метрологических организаций, поскольку это было сделано в ключевых сличениях Международного комитета по мерам и весам. Они обеспечивают передачу

информации об опорном значении ключевых сличений Международного комитета по мерам и весам в региональные метрологические организации.

Пилотная лаборатория после формирования группы участников сличений, составления технического протокола и графика сличений направляет участникам эталон сравнения. Все участники выполняют многократное измерение эталона сравнения и представляют свои результаты измерений \hat{Q}_i^* с оценками их стандартной неопределенности u_i^* в пилотную лабораторию.

Пилотная лаборатория приводит полученные результаты измерений к опорному значению ключевых сличений Международного комитета по мерам и весам. Сначала выясняют, насколько отличаются друг от друга значения идентичных эталонных мер, использовавшихся в сличениях региональных метрологических организаций и в сличениях Международного комитета по мерам и весам. Для этого используют результаты измерения этих мер связующими организациями — \hat{Q}_j^* и \hat{Q}_j :

$$\Delta = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta_j}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{\Delta_j}}};$$

$$u_{\Delta} = \sqrt{\frac{2}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{\Delta_j}}}},$$

где $\Delta_j = \hat{Q}_j - \hat{Q}_j^*$; m — число связующих организаций.

Затем определяют *трансформированные* (приведенные к опорному значению ключевых сличений Международного комитета по мерам и весам) *результаты измерений* всех лабораторий-участников с их *неопределенностями* по формулам:

$$\hat{Q}_i^{**} = \hat{Q}_i^* + \Delta, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$u_{\hat{Q}_i^{**}} = \sqrt{u_{\hat{Q}_i^*}^2 + u_{\Delta}^2},$$

где n — число национальных эталонов региональных метрологических организаций, участвовавших в сличениях.

После этого для всех национальных эталонов, участвовавших в сличениях региональных метрологических организаций, кроме эталонов связующих организаций, оценивают *степень эквивалентности*

$$d_i = \hat{Q}_i^{**} - \hat{Q}_{\text{МКМВ}}$$

и ее *стандартную неопределенность*

$$u_{d_i} = \sqrt{u_{\hat{Q}_i^{**}}^2 + u_{\hat{Q}_{\text{МКМВ}}}^2 + u_{\Delta}^2 \left[1 - u_{\hat{Q}_{\text{МКМВ}}}^2 \sum_{j=1}^m \frac{1}{u_{\hat{Q}_j}^2} \right]}.$$

Если условие (22) выполняется, то считается, что оценка неопределенности результатов измерений, заявленная соответствующим национальным метрологическим институтом (лабораторией), с вероятностью 0,95 согласуется с данными сличений. Это является подтверждением заявленной точности национального эталона. В таком случае заявление об измерительных возможностях национального метрологического института вводится в базу данных Международного бюро мер и весов и публикуется в Интернете на сайте этой международной организации. Если же условие (22) не выполняется, то это свидетельствует о том, что заявленная национальным метрологическим институтом точность национального эталона результатами сличений не подтверждается. Тогда оценка неопределенности воспроизведения единицы этим эталоном может быть пересмотрена в сторону увеличения, и информация об измерительных возможностях национального метрологического института опубликована с этой увеличенной оценкой неопределенности.

В рассмотренных примерах схема передачи информации о размере единицы сокращена на одну ступень: от международного до национального эталона. Если через n обозначить число сокращаемых ступеней, а через N — общее их число, то выраженное в процентах отношение n/N представляет собой *степень децентрализации*. Таким образом, степень децентрализации может быть в пределах от 0 % (например, при воспроизведении единицы массы *килограмма*) до 100 % (при воспроизведении единиц эталонами, встроенными в средства измерений).

Точно так же можно говорить о децентрализации воспроизведения единиц в национальном масштабе, т. е. в рамках государственных схем передачи информации о размерах единиц. Требования потребителей к точности измерений далеко неодинаковы, и локальные схемы передачи информации о размерах единиц могут возглавляться *исходными* эталонами, обеспечивающими меньшую точность независимого воспроизведения единиц, чем государственные, но обладающими достаточной стабильностью. Производная единица путем заимствования информации из других государственных схем (см. рис. 98, 99, 101, 109) может воспроизводиться в любых полях вплоть до поля средств измерений. Аналогично при децентрализованном воспроизведении единиц исходные эталоны, независимо воспроизводящие единицу, могут размещаться в любых полях, кроме верхнего, включая поле средств измерений (в этом случае они называются *встроенными эталонами*). Тогда степень децентрализации будет зависеть от того, в поле рабочих эталонов какого разряда будут размещаться *исходные* эталоны. Локальные схемы передачи информации о размере одной и той же единицы могут иметь разную степень децентрализации. Затраты на метрологическое обслуживание средств измерений будут при этом существенно сокращены.

Темы для обсуждения

I. Рассмотреть возможность децентрализованного воспроизведения реперных точек в выбранном диапазоне МТШ-90 и разработки локальной схемы передачи информации о размере единицы температуры средствам измерений в этом диапазоне.

II. Рассмотреть перспективу применения в открытом космосе средств измерений электрических величин со встроенными эталонами единиц, основанными на использовании квантовых эффектов Холла и Джозефсона.

III. Рассмотреть возможность 100 % децентрализации воспроизведения единицы плоского угла при производстве угломерных средств измерений с отсчетными устройствами в виде круговых шкал, получаемых путем деления окружности (угла 2π радиан) на угловые градусы.

6.3. Методическая основа обеспечения единства измерений

6.3.1. Методики измерений

Накопленный опыт получения измерительной информации показывает, что основная потеря точности при измерениях происходит не за счет возможной метрологической неисправности применяемых средств измерений а, в первую очередь, за счет несовершенства методов (методик) выполнения измерений.

Точность измерений зависит от точности применяемого *средства измерений*, точности *метода измерения* и от степени влияния *внешних факторов*. В каждом отдельном случае вклад их может быть неодинаковым.

Например, при измерении массы материала, движущегося по транспортеру, точность весового устройства обычно в 10...20 раз выше общей точности взвешивания массы.

При измерении сопротивления меньше 10 Ом на одинарном мосту сопротивление соединительных проводов существенно влияет на точность его измерения.

При измерении яркостной температуры, поверке ртутных термометров следует учитывать точность «считывания» показаний.

Большое влияние на точность измерений оказывают внешние факторы, а также подготовка средства измерений и измеряемого объекта к измерению.

Общая точность измерений определяется методикой измерений, под которой понимается совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности. Федеральные органы исполнительной власти, осуществляющие нормативно-правовое регулирование в области:

- обеспечения потребности граждан, общества и государства в получении объективных, достоверных и сопоставимых результатов измерений, используемых в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, животного и растительного мира, обеспечения обороны и безопасности государства, в том числе экономической безопасности;
- содействия развитию экономики Российской Федерации и научно-техническому прогрессу,

по согласованию с Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандартом) определяют измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, и устанавливают к ним обязательные метрологические требования, в том числе показатели точности измерений.

По области применения методики измерений подразделяются на два вида, показанные на рис. 118.



Рис. 118. Виды методик измерений

Типовые методики измерений применяются преимущественно в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В них используются средства измерений, относящиеся к тому или иному типу, зарегистрированному в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений.

Индивидуальные методики измерений разрабатываются и применяются преимущественно в сфере ответственности пользователей средств измерений, хотя могут применяться и в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В них используются средства измерений с известными метрологическими характеристиками.

Основные этапы разработки методики измерений

1. Формирование исходных данных для разработки методики.

Исходные данные для разработки методики измерений включают:

- назначение методики, содержащее ответы на вопросы: что измеряют? (какую физическую величину) и для чего измеряют? (как используются результаты измерений). При необходимости в назначение методики включают ограничения на пределы ее применимости;
- характеристики измеряемой величины, включающие диапазон ее возможных значений и данные о возможных ее изменениях в процессе измерений;
- нормы точности измерений, в качестве которых могут приводиться пределы допускаемых значений погрешности или неопределенности измерений со ссылкой на документ, в котором они установлены (при наличии такого документа);
- условия измерений, которые задаются в виде диапазона значений влияющих величин (климатических, механических, электрических и т. п.). Дополнительно могут указываться статистические характеристики влияющих величин (средние значения, средние квадратические отклонения), а также предельные скорости их изменения;
- характеристики объекта измерений, в качестве которых приводятся диапазоны значений неинформативных (неизмеряемых) параметров модели объекта измерений, которые могут влиять на точность измерений.

Исходные данные, как правило, излагаются в *техническом задании на разработку методики измерений*, которое помимо того может включать ряд дополнительных требований, таких как ограничение на длительность измерений, габариты, массу и стоимость средств измерений и прочих. Отдельные исходные данные могут заменяться ссылками на документы, в которых они содержатся, или вообще не указываться, если они очевидны или если техническое задание на разработку методики измерений является разделом другого технического задания, из которого эти данные следуют.

2. Выбор метода и средств измерений.

Выбор метода и средств измерений производится в соответствии с рекомендациями МИ 1967-88. Для индивидуальных методик измерений допускается не выполнять расчет характеристик погрешности измерений, предусмотренный этим документом.

3. Создание и экспериментальные исследования реализаций методик измерений.

Создание и экспериментальные исследования опытной реализации типовой методики измерений выполняются при необходимости уточнения и конкретизации модели погрешности измерений, выбранной на основе теоретических исследований. Результаты экспериментальных исследований используются при выборе метода и средства измерений по п. 2.

Создание и предварительное (при необходимости) экспериментальное исследование реализации индивидуальной методики измерений выполняются с целью уточнения и конкретизации способов экспериментального определения характеристик погрешности измерений или ее составляющих либо исходных данных, необходимых для их расчета (количество и расположение точек в диапазоне измерений, количество измерений в каждой точке, выбор параметров испытательных сигналов и т. п.). Результаты предварительного экспериментального исследования используются при разработке программы экспериментального определения характеристик погрешности измерений по п. 5.

4. Разработка описания методики измерений.

Описание методики измерений является документом, регламентирующим этот вид деятельности, и должно содержать полный перечень рекомендаций и требований, соблюдение которых гарантирует получение результатов измерений с установленными показателями точности. Характер этого нормативно-технического документа (НТД) зависит от того, где проводятся измерения и используются их результаты: в двух или более ведомствах (отраслях), в одном ведомстве, на одном предприятии (организации).

В качестве НТД на методики измерений, результаты которых используются в двух или более ведомствах, разрабатывается ГОСТ или МИ — методические указания метрологических институтов Росстандарта. ГОСТ разрабатывается в том случае, если сведения о методике измерений передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. В качестве НТД на методики измерений, результаты которых используются в одном ведомстве, разрабатываются *отраслевые методики измерений*, а в качестве НТД на методики измерений, результаты которых применяются на одном предприятии, разра-

батываются *стандарты предприятий*. Рекомендуемая структура этих документов приводится ниже.

5. *Разработка программы экспериментального определения характеристик погрешности измерений или ее составляющих, либо исходных данных, необходимых для их расчета.*

Программа экспериментального определения характеристик погрешности реализации методики измерений или составляющих этой погрешности, либо исходных данных, необходимых для расчета этих составляющих, разрабатываются для индивидуальных методик измерений и должны содержать требования к средствам измерений, необходимым для эксперимента, методику проведения эксперимента и способы обработки экспериментальных данных.

6. *Аттестация методики измерений.*

Методики измерений перед их вводом в действие должны быть аттестованы. Аттестация включает:

- разработку и утверждение программы аттестации;
- выполнение исследований в соответствии с программой;
- составление и оформление отчета об аттестации;
- оформление аттестата методики измерений.

При аттестации должна быть проверена правильность учета всех факторов, влияющих на точность измерений, установлена достоверность их результатов.

В зависимости от вида методики измерений (типовая, индивидуальная), ее сложности и ответственности, полноты и качества исходной информации выбирают один из следующих способов аттестации:

- теоретический;
- экспериментальный;
- расчетно-экспериментальный.

Теоретический способ используют для аттестации типовых методик измерений. Решение о допустимости (недопустимости) применения методики измерений выносится на основании:

- теоретического анализа качества и полноты исходных данных, использованных при разработке методики измерений, описания методики, отчета о выборе метода и средств измерений (при наличии такового);
- анализа правильности расчета погрешности измерений;
- сопоставления расчетных значений погрешности с нормированными значениями.

Экспериментальный способ используют для аттестации индивидуальных методик измерений в тех случаях, когда технически возможна и экономически целесообразна постановка эксперимента, воспроизводящего одновременное действие всех источников погрешности измерений. Для этого условия эксперимента должны полностью охватывать условия применения методики измерений (по номенклатуре и диапазонам значений влияющих величин, параметров объекта

измерений и т. п.). В этом случае решение о допустимости (недопустимости) применения методики измерений выносится на основании:

- теоретического анализа качества и полноты исходных данных, использованных при разработке методики измерений, описания методики, отчета о выборе метода и средств измерений (при наличии такового);
- изучения программы экспериментального определения характеристик погрешности измерений;
- результатов эксперимента по определению характеристик погрешности;
- сопоставления значений погрешности, найденных на основе экспериментальных данных, с нормированными значениями.

Расчетно-экспериментальный способ используют для аттестации индивидуальных методик измерений в тех случаях, когда постановка такого эксперимента, как в предыдущем случае, технически невозможна или экономически нецелесообразна, и экспериментально определяются только исходные данные (все или некоторые), необходимые для расчета погрешности или ее составляющих, подлежащих суммированию. Решение о допустимости (недопустимости) применения методики измерений выносится тогда на основании:

- теоретического анализа качества и полноты исходных данных, использованных при разработке методики измерений, описания методики, отчета о выборе метода и средств измерений (при наличии такового);
- изучения программы экспериментального определения характеристик составляющих погрешности измерений или исходных данных, необходимых для расчета погрешности;
- результатов эксперимента по определению характеристик составляющих погрешности или исходных данных, необходимых для расчета погрешности;
- расчета погрешности измерений;
- сопоставления рассчитанных значений погрешности с нормированными значениями.

Аттестацию методик измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, производят аккредитованные в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели.

7. Оформление результатов разработки методики измерений.

Результаты разработки методики измерений могут оформляться:

- отдельным документом, содержащим описание методики измерений (см. п. 4);
- разделом конструкторского, технологического или эксплуатационного документа, содержащим описание методики измерений, или документа на методику испытаний (контроля) продукции;
- указанием в конструкторском, технологическом или эксплуатационном документе, либо документе на методику испытаний (контроля) продукции типа средства измерений и номера (наименования) утвержденного документа по его эксплуатации, применение которых обеспечивает выполнение из-

мерений с погрешностью, удовлетворяющей нормированному значению. Этот способ оформления допускается только в простейших случаях, когда, например, по типовой методике измерений средство измерений применяется в нормальных условиях и погрешность измерений определяется его основной погрешностью, т. е. другие составляющие погрешности несущественны.

Для индивидуальных методик повышенной сложности и ответственности дополнительно оформляется аттестат, удостоверяющий гарантируемые значения характеристик погрешности измерений.

Рекомендуемая структура документов на методики измерений

Если описание методики измерения оформляется в виде отдельного документа, то его наименование должно соответствовать требованиям ГОСТ 1.5. Допускается отражать в наименовании специфику измерений физической величины, например:

«Государственная система обеспечения единства измерений
МАССА НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ГРУЗОВ,
ПЕРЕВОЗИМЫХ ПО ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ
Методика измерений большегрузными платформенными весами»

При большом числе физических величин допускается применять их обобщенное наименование, например:

«ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
В РАСКРЫВЕ ОСТРОНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН»

Документ на методику измерений должен содержать вводную часть и разделы, расположенные в следующем порядке:

- нормы погрешности измерений;
- средства измерений и вспомогательные устройства;
- метод (методы) измерений;
- требования безопасности;
- требования к квалификации операторов;
- условия выполнения измерений;
- подготовка к выполнению измерений;
- выполнение измерений;
- обработка результатов измерений;
- оформление результатов измерений.

Допускается объединять, исключать и дополнять разделы.

Вводная часть должна содержать назначение и область применения документа на методику измерений. Она излагается в редакции:

«Настоящий (далее — вид документа) устанавливает методику измерений (далее следует наименование физической величины, в необходимых случаях — с указанием ее специфики и специфики измерений)».

При ссылке на конкретную продукцию во вводной части указывают нормативно-технический документ, распространяющийся на эту продукцию.

Нормы погрешности измерений — раздел, содержащий числовые значения норм погрешности измерений, гарантированных при реализации методики измерений. Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

«Реализация данной методики измерений обеспечивает выполнение измерений с погрешностью, не превышающей... (далее — числовые характеристики погрешности измерений, выбираемые из числа предусмотренных МИ 1317-86)».

Нормы погрешности измерений одной и той же физической величины могут быть различными для разных значений этой величины, разной продукции, разных условий выполнения измерений и областей применения их результатов. Если в документе на методику измерений указано несколько норм погрешности для одной или нескольких физических величин, то их приводят в форме таблиц, графиков или уравнений.

Средства измерений и вспомогательные устройства — раздел, содержащий перечень технических средств, применяемых при выполнении измерений (измерительных установок, измерительных систем, стендов, средств измерений, устройств и др.). Наряду с наименованиями технических средств указываются обозначения государственных стандартов технических требований (технических условий) к ним, обозначения их типов, утвержденных по результатам испытаний, или метрологические характеристики по ГОСТ 8.009-84, установленные в результате метрологической аттестации. При большом объеме метрологических характеристик допускается приводить их в приложении.

Чертежи схем или блок-схем измерительных установок и стендов при необходимости их описания тоже могут быть приведены в разделе или в приложении.

Если документ устанавливает методику измерений двух или более физических величин, перечень средств измерений излагают в виде таблицы.

В раздел допускается включать указание, разрешающее применение технических средств, отличных от указанных в перечне, но имеющих такие же метрологические характеристики.

Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

«При выполнении измерений применяют следующие измерительные установки, измерительные системы, стенды, средства измерений и устройства: (далее следует перечень)» или «При выполнении измерений применяют измерительные установки, измерительные системы, стенды, средства измерений и устройства, приведенные в табл. 1».

Метод измерений — раздел, содержащий описание физического принципа, положенного в основу метода, а также, при необходимости, данные о точности метода. Если для измерений одной физической величины применяют несколько методов или документ устанавливает методики измерений двух или более физических величин, описание каждого метода выделяется в отдельный подраздел. Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

«Измерения (далее идет наименование физической величины) выполняются методом (следует описание физического принципа, лежащего в основе метода)».

Требования безопасности при выполнении измерений включают обеспечение безопасности труда, производственную санитарию и охрану окружающей среды. При наличии нормативно-технических документов, регламентирующих требования безопасности при выполнении измерений, приводятся ссылки на эти документы.

Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

«При выполнении измерений (далее идет наименование физической величины) соблюдаются следующие требования безопасности: (перечисляются необходимые требования)».

Требования к квалификации операторов представляют собой требования к необходимому уровню квалификации (профессии, образовании, практическим навыкам и т. д.) лиц, допускаемых к выполнению измерений и обработке их результатов. Этот раздел включается в документ при сложных методах измерений и способах обработки их результатов. Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

«К выполнению измерений и (или) обработке их результатов допускаются лица (далее приводятся сведения о необходимом уровне квалификации)».

Условия выполнения измерений представляют собой перечень влияющих величин, их номинальных значений (или области значений) с указанием пределов допускаемых отклонений, а также требований к характеристикам объекта измерений, соблюдение которых обеспечивает необходимую точность измерений. К числу влияющих факторов при выполнении измерений относят внешние воздействующие факторы, параметры сред (образцов), применяемых при измерениях, напряжение и частоту переменного электрического тока, импедансы объектов измерений и т. д.

Если документ устанавливает методику измерений двух или более физических величин, измерения которых должны быть выполнены в разных условиях, то допускается перечни этих физических величин приводить в виде таблицы.

Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

«При выполнении измерений соблюдаются следующие условия: (далее следует перечень)» или «При выполнении измерений соблюдаются условия, приведенные в табл. 2».

Подготовка к выполнению измерений предусматривает проведение целого ряда подготовительных работ. К их числу относится определение значений влияющих величин, сборка схем, подготовка и проверка режимов работы измерительных установок, измерительных систем, стендов, средств измерений, устройств, включение и приведение их в рабочее состояние (прогрев, установка нуля и т. п.) и т. д. Если порядок проведения подготовительных работ установлен в НТД на измерительные установки, измерительные системы, стенды, средства измерений и устройства, то приводятся ссылки на эти НТД.

Если при выполнении измерений используются определенные среды (образцы), то порядок их создания (отбора образцов, приготовления растворов и т. п.) и технические требования к этим средам приводятся в справочном приложении.

Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

|| «При подготовке к выполнению измерений проводятся следующие работы: (далее следует перечень и описание подготовительных работ)».

Выполнение измерений — раздел, содержащий перечень и объем (периодичность и число) измерений, требования к последовательности проведения операций, их описание, а также указание числа значащих цифр в результатах промежуточных измерений.

Если порядок выполнения операций установлен в НТД на измерительные установки, измерительные системы, стенды, средства измерений и устройства, то приводятся ссылки на эти НТД.

Если для измерений одной физической величины применяют несколько методов или документ устанавливает методики измерений двух или более физических величин, описание каждой операции выделяется в отдельный подраздел.

В разделе (подразделе) при необходимости указывается порядок операций, выполняемых при приведении измерительных установок, измерительных систем, стендов, средств измерений и устройств в исходное состояние.

В разделе (подразделе) приводится требование о необходимости ведения записей результатов промежуточных измерений и значений влияющих величин в документе (протоколе, журнале и т. д.) или автоматическим способом (на магнитной ленте, ленте самопишущего прибора и т. д.). При необходимости в справочном приложении приводят форму записи результатов промежуточных измерений и значений влияющих величин или программы хранения и обработки информации на ЭВМ.

Первый пункт этого раздела (подраздела) излагается в редакции:

|| «При выполнении измерений (далее идет наименование измеряемой физической величины) выполняются следующие операции (следует описание операций)».

Обработка результатов измерений содержит описание способов получения результатов измерений. Если последние установлены в других НТД, то приводятся ссылки на эти НТД, например:

|| «Обработка результатов измерений (далее идет название физической величины) — по ГОСТ 8.207-76».

Если для измерений одной физической величины применяют несколько методов или документ устанавливает методики измерений двух или более физических величин, описание каждого способа обработки выделяется в отдельный подраздел.

В разделе (подразделе) при необходимости приводят данные, требуемые для получения результатов измерений (константы, уравнения, графики, таблицы и т. д.). При большом объеме данных их выносят в приложение.

В разделе (подразделе) устанавливается требование о необходимости ведения записей обработки результатов промежуточных измерений. При необходимости в приложении приводят форму этих записей или программы хранения и обработки информации на ЭВМ. Допускается вести записи результатов и обработки результатов промежуточных измерений в одном документе (протоколе, журнале и т. д.) или на одной магнитной ленте, ленте самопишущего прибора и т. п.

Первый пункт этого раздела излагается в редакции:

«Обработку результатов измерений (далее идет название физической величины) выполняют способом: (следует описание способа)».

Оформление результатов измерений — заключительный раздел, содержащий требования к форме, в которой приводятся полученные результаты измерений. В нем же указывается вид носителя полученной измерительной информации (документ, магнитная лента, лента самопишущего прибора и т. д.), на котором сохраняются данные о полученных результатах измерений, о применяемых измерительных установках, измерительных системах, стендах, средствах измерений и устройствах, технические требования к средам (образцам), применяемым при измерениях и т. п. Документ или запись на ленте самопишущего прибора удостоверяет лицо, проводившее измерения, а при необходимости — руководитель (главный метролог) организации (предприятия), подписи которых заверяются печатью организации (предприятия).

При большом объеме данных форму документа приводят в приложении к методике измерений. При небольшом — допускается объединять этот документ с записями результатов и обработки результатов промежуточных измерений.

В этом же разделе устанавливается требование о необходимости выдачи документа о результатах измерений и, если это необходимо, в приложении приводят форму такого документа.

Первый пункт заключительного раздела излагается в редакции:

«Результаты измерений оформляют протоколом, форму которого приводят в обязательном приложении (далее следует номер приложения)», или «Результаты измерений оформляют записью в журнале по форме, приведенной в таблице (далее следует таблица)», или «Результаты измерений оформляют (далее следует наименование автоматического способа)».

Контроль методик измерений

Методики измерений допускаются к применению после их первичного контроля. *Первичный контроль* осуществляется не только перед первым применением методики после ее создания, но и после ремонта или замены средств измерений или вспомогательных технических устройств, а также по другим причинам, которые могли повлиять на качество методики. Исключение составляют методики измерений, аттестованные экспериментальным способом на месте применения. Их первичный контроль не производится.

В процессе применения методики измерений подвергаются *периодическому контролю*, а индивидуальные методики и *повторной аттестации* в сроки,

предусмотренные их описанием или аттестатом. Действующие на предприятиях методики измерений периодически *пересматриваются* с целью исключения из них устаревших средств и методов измерений.

В простейших случаях (см. п. 7) контроль методики измерений сводится к проверке срока поверки используемых в ней средств измерений и в случае его истечения к очередной поверке этих средств измерений.

В общем случае контроль включает в себя проверку схемы соединения средств измерений между собой и с объектом измерений, проверку монтажа средств измерений и вспомогательных технических устройств, проверку сроков поверки средств измерений, а при необходимости и экспериментальную проверку характеристик погрешности измерений или ее отдельных составляющих, а также иных характеристик, на которые может оказать существенное влияние качество монтажа средств измерений и вспомогательных технических устройств (если это первичный контроль) или которые наиболее нестабильны во времени (если это периодический контроль).

Положительные результаты контроля удостоверяются *свидетельством о контроле* или *записью в аттестате* для индивидуальных методик измерений. В простейших случаях результаты контроля специально не оформляются и удостоверяются *свидетельством о поверке* средства измерений или наличием на нем *клейма*.

Способ оформления результатов контроля оговаривается в описании методики измерений.

6.3.2. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений

Утверждение типа средств измерений является формой *государственного регулирования* в области обеспечения единства измерений в стране. Решение об утверждении типа принимается Росстандартом по результатам обязательных испытаний средств измерений в целях утверждения типа. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений регламентирован приказом Минпромторга России от 30 ноября 2009 г. № 1081.

Испытания проводятся юридическими лицами, аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений по заявкам заинтересованных лиц в соответствии с условиями заключенных договоров (см. п. 3.2). *Заявка* должна содержать следующую информацию:

- полное наименование и адрес Заявителя;
- сведения о документе, согласно которому юридическому лицу или индивидуальному предпринимателю даны полномочия представлять производителей средств измерений;
- полное наименование и адрес изготовителя и/или изготовителей данного типа средств измерений;
- наименование средства измерений;
- назначение средства измерений;

- область применения средства измерений с указанием необходимых разрешительных документов и их наличия;
- характер производства средства измерений (серийное или единичное);
- сведения о наличии программного продукта, используемого для получения результатов измерений;
- заявляемые метрологические и технические характеристики средства измерений, включая показатели точности;
- сведения о документе на методику поверки;
- сведения о документах, по которым осуществляется изготовление средства измерений;
- сведения о наличии протоколов предварительных испытаний средства измерений;
- сведения об обязательных метрологических и технических требованиях к средствам измерений (при необходимости).

Заявка на проведение испытаний средств измерений единичного производства дополнительно должна содержать заводские номера предъявляемых на испытания экземпляров средства измерений.

Заявка должна также содержать обязательство оплаты Заявителем расходов на проведение испытаний средств измерений в соответствии с условиями заключаемого договора (контракта).

Одновременно с заявкой Заявитель представляет эксплуатационные документы на средство измерений (руководство по эксплуатации, формуляр, паспорт), а также фотографии общего вида средств измерений и (или) рекламные проспекты. Эксплуатационные документы на средства измерений, ввозимые на территорию Российской Федерации, должны быть оформлены на русском языке.

Организация, проводящая испытания (Испытатель), рассматривает заявку, принимает решение о возможности проведения испытаний и в 2-недельный срок после получения заявки:

- при положительном решении направляет Заявителю проект договора (контракта), в котором определяются сроки и место проведения испытаний, стоимость и порядок оплаты работ, включая проверку результатов испытаний;
- при отрицательном решении сообщает в письменном виде об этом Заявителю.

После подписания *договора (контракта)* Испытатель разрабатывает, согласовывает с Заявителем и утверждает *программу испытаний*. При испытаниях средств измерений в целях утверждения типа должен учитываться характер их производства (серийное или единичное). *Программа испытаний* разрабатывается с учетом положений национальных стандартов, устанавливающих общие требования к средствам измерений, их разработке, испытаниям и применению (при наличии соответствующих национальных стандартов), а также обязательных метрологических и технических требований к средствам измерений, установленных законодательством Российской Федерации об обеспечении

единства измерений и законодательством Российской Федерации о техническом регулировании (при их наличии). *Программа испытаний* устанавливает:

- объект испытаний;
- количество представляемых на испытания серийно изготовленных образцов средств измерений;
- содержание и объем испытаний;
- методы (методики) испытаний;
- условия проведения испытаний;
- алгоритмы обработки полученных при испытаниях результатов.

Программа испытаний должна предусматривать:

- определение метрологических и технических характеристик средства измерений, включая показатели точности, выраженных в единицах величин, допущенных к применению в Российской Федерации;
- идентификацию программного обеспечения и оценку его влияния на метрологические характеристики средства измерений (при наличии программного обеспечения);
- разработку или выбор методики поверки и ее опробование;
- определение интервала между поверками;
- анализ конструкции испытываемого средства измерений на наличие ограничений доступа к определенным частям средств измерений (включая программное обеспечение) с целью предотвращения несанкционированной настройки и вмешательства, которые могут привести к искажению результатов измерений.

При наличии обязательных требований к средствам измерений, в том числе требований к их составным частям, программному обеспечению и условиям эксплуатации средств измерений, программа испытаний должна предусматривать проверку их выполнения.

После утверждения программы испытаний Заявитель представляет на испытания образцы средств измерений.

Испытатель проводит *испытания* в соответствии с программой испытаний. Результаты работ, предусмотренных программой, оформляются протоколами.

Испытания средств измерений единичного производства проводятся на всех представляемых образцах.

По результатам испытаний Испытатель разрабатывает *описание типа средства измерений*, утверждает (при необходимости) *методику поверки*, оформляет *акт испытаний* средства измерений в целях утверждения типа (далее — акт испытаний средства измерений). В *акте испытаний* средства измерений указываются:

- название акта испытаний средства измерений с приведением полного наименования типа средства измерений, представленного Заявителем, и полного наименования организации Заявителя;

- сведения о проведении испытаний (наименование и номер аттестата аккредитации Испытателя, полное наименование типа средств измерений, представленных на испытания, наименование изготовителя или изготовителей средств измерений, сроки проведения испытаний, основание проведения испытаний с указанием даты и номера заявки, место проведения испытаний);
- сведения о представленных для проведения испытаний образцах (полное наименование типа средств измерений, заводские номера представленных образцов);
- общие сведения о результатах испытаний (полное наименование типа испытанных средств измерений, наименование программы, в соответствии с которой испытания проведены);
- оценка результатов испытаний (положительные или отрицательные);
- детализированные сведения по результатам испытаний (установленные значения метрологических и других технических характеристик, факт опробования методики поверки с приведением информации о ней, рекомендованный интервал между поверками, факт разработки проекта описания типа средства измерений);
- сведения о результатах проверки обязательных метрологических и технических требований к средствам измерений (при наличии в программе испытаний);
- прилагаемое к акту испытаний средства измерений приложение (протоколы испытаний средства измерений, проект описания типа средства измерений, методика поверки).

Акт испытаний средства измерений оформляется на бланке Испытателя в двух экземплярах и подписывается руководителем и представителями организации Испытателя, с указанием занимаемых ими должностей и расшифровки подписей. Подпись руководителя заверяется гербовой печатью Испытателя, под подписью указывается дата подписания акта испытаний средства измерений. Один экземпляр акта испытаний средства измерений с приложениями, после ознакомления с ним и визирования представителем Заявителя, направляется Заявителю.

Утверждение типа средств измерений удостоверяется *свидетельством*, которое оформляется Росстандартом на основании принятого им решения (*приказа*) об утверждении типа средств измерений (см. п. 3.2). В *свидетельстве* указываются:

- номер свидетельства;
- срок действия свидетельства;
- полное наименование типа средства измерений;
- полное наименование изготовителя средства измерений;
- регистрационный номер типа средств измерений;
- дата и номер решения (приказа) Росстандарта об утверждении типа средства измерений;
- информация о методике поверки;

- заводской номер средства измерений (только в свидетельстве об утверждении типа средства измерений единичного производства);
- интервал между поверками. Продолжительность интервала между поверками для средств измерений устанавливается в решении Росстандарта об утверждении типа средства измерений по результатам проведенных в установленном порядке испытаний в целях утверждения типа.

Свидетельство оформляется на бланке Росстандарта в течение 5 рабочих дней после принятия решения об утверждении типа средств измерений. Оно оформляется в одном экземпляре отдельно на каждый тип средств измерений с учетом характера их производства (серийное или единичное) и имеет обязательное приложение, содержащее описание типа средств измерений. *Свидетельство* подписывается заместителем руководителя Росстандарта с указанием даты подписания и заверяется гербовой печатью.

В описании типа средства измерений указывается:

- наименование типа средства измерений;
- назначение средства измерений;
- описание средства измерений (конструкция, принцип действия, число модификаций, их обозначение и особенности, описание программного обеспечения при его наличии);
- метрологические, в том числе показатели точности, и технические характеристики средства измерений, включая идентификационные данные программного обеспечения, оценку его влияния на метрологические характеристики средства измерений и уровень защиты программного обеспечения от непреднамеренных и преднамеренных изменений (при наличии программного обеспечения);
- место и способ нанесения знака утверждения типа на средство измерений и (или) сопроводительные документы;
- комплектность средства измерений;
- наименование и обозначение методики поверки, перечень эталонов, применяемых при поверке;
- сведения о методиках (методах) измерений (наименование эксплуатационного документа, в котором содержится методика или метод измерений);
- нормативные документы, устанавливающие требования к средству измерений конкретного типа, метод его испытаний и методики поверки;
- рекомендация по области применения (при наличии);
- изготовитель средства измерений (полное наименование и юридический адрес).

Описание типа средства измерений имеет сквозную нумерацию листов. На каждом листе указывается номер текущего листа и сколько всего листов в описании. На первом листе указывается, приложением к какому свидетельству оно является (указывается номер свидетельства). Оно подписывается заместителем руководителя Росстандарта с указанием даты подписания и заверяется гербовой печатью.

Свидетельство направляется (вручается) юридическому лицу или индивидуальному предпринимателю, подавшему заявку на утверждение типа средства

измерений (далее — держателю свидетельства). Выдача *свидетельства* регистрируется в журнале учета выдачи свидетельств об утверждении типа средств измерений.

Журнал учета выдачи свидетельств об утверждении типа средств измерений содержит следующие сведения:

- порядковый номер свидетельства;
- наименование утвержденного типа средств измерений;
- наименование изготовителя типа средств измерений;
- наименование организации, проводившей испытания в целях утверждения типа средств измерений;
- регистрационный номер типа средств измерений;
- срок действия свидетельства;
- информацию о выдаче свидетельства (дата выдачи и подпись лица, получившего свидетельство).

Копии свидетельств передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

В случае утраты свидетельства держатель свидетельства имеет право на получение *дубликата свидетельства*, который предоставляется ему на основании заявления в письменной форме. *Дубликат свидетельства* оформляется с пометкой «дубликат» в одном экземпляре, который направляется (вручается) держателю свидетельства. *Копия дубликата свидетельства* хранится в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений.

Переоформление свидетельства осуществляется по заявлению держателя свидетельства на основании оформленного приказом решения Росстандарта в случае:

- его реорганизации;
- изменения его наименования;
- изменения интервала между поверками средств измерений.

Сведения о переоформлении свидетельства и *копия свидетельства* (в случае его переоформления) передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Интервал между поверками может быть изменен по решению Росстандарта, принятого на основании заявления держателя свидетельства и результатов проверки установленного интервала между поверками. Изменение интервала между поверками средств измерений устанавливается по результатам повторных испытаний в целях утверждения типа только в части определения продолжительности интервала между поверками средств измерений.

Срок действия свидетельств:

- для свидетельств об утверждении типа средств измерений серийного производства — 5 лет;
- для свидетельств об утверждении типа средств измерений единичного производства — без ограничения срока.

Срок действия свидетельств об утверждении типа средств измерений серийного производства может быть продлен без проведения испытаний на последующие 5 лет решением Росстандарта на основании письменного заявления держателя свидетельства с представлением информации об отсутствии изменений в документации на изготовление средств измерений и анализа результатов государственного метрологического надзора и обращений граждан с претензиями к выпускаемым средствам измерений за предыдущие 5 лет. На основании принятого решения вносятся *изменения* в свидетельство. Копия решения Росстандарта о *продлении срока действия* свидетельства и *копия свидетельства* передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

6.3.3. Документы на методики поверки средств измерений

Документы по поверке разрабатывают предприятия-разработчики (изготовители) средств измерений, а также другие предприятия и организации (в том числе Государственной метрологической службы), специализирующиеся в соответствующей области измерений. Они могут быть трех видов:

- государственные стандарты групп однотипных (одного типа) средств измерений (при наличии государственных стандартов общих технических условий к соответствующим средствам измерений);
- рекомендации по поверке групп однотипных (одного типа) средств измерений, принимаемых (утверждаемых) Росстандартом или (по его поручению) органами Государственной метрологической службы;
- отдельные документы (например, инструкции по поверке) в составе эксплуатационной документации или разделы эксплуатационных документов (например, инструкций по эксплуатации), представляемые на испытания с целью утверждения типа средств измерений.

Рекомендуемая структура документов на методики поверки средств измерений

Если описание методики поверки оформляется в виде отдельного документа, то его наименование должно соответствовать требованиям ГОСТ 1.5. Оно состоит из наименования национальной системы, в которую входят документы по поверке:

|| «Государственная система обеспечения единства измерений»,

наименования и условного обозначения типа поверяемого средства измерений (группы однотипных поверяемых средств измерений) и наименования объекта регламентации:

|| «Методика поверки».

Документ на методику поверки должен состоять из вводной части и разделов, расположенных в следующем порядке:

- операции поверки;
- средства поверки;

- требования к квалификации поверителей (если к ней предъявляются особые требования);
- требования безопасности;
- условия поверки;
- подготовка к поверке;
- проведение поверки;
- обработка результатов измерений;
- оформление результатов поверки.

Допускается объединять, исключать и дополнять разделы.

Во вводной части устанавливается назначение документа по поверке, а также уточняются объект регламентации и степень соответствия документа по поверке соответствующим документам международных организаций. Указывают также, методику какой поверки устанавливает документ (первичной, периодической, первичной и периодической).

Во вводной части указывается межповерочный интервал.

Раздел «*Операции поверки*» содержит перечень наименований операций, проводимых при поверке. При этом предусматривается возможность прекращения поверки при получении отрицательных результатов при проведении той или иной операции.

В разделе рекомендуется указывать нормы времени на операции поверки.

Раздел «*Средства поверки*» содержит перечень основных и вспомогательных средств поверки, стандартных образцов, оборудования и материалов, для которых указываются обозначения нормативных документов, регламентирующих технические требования, и (или) метрологические и основные технические характеристики этих средств. В разделе указывается на возможность применения средств, не включенных в перечень, но обеспечивающих определение (контроль) метрологических характеристик поверяемых средств измерений с требуемой точностью.

Раздел «*Требования к квалификации поверителей*» содержит указание о необходимости проведения поверки только лишь лицами, аттестованными в качестве поверителей, и (если это требуется) сведения об уровне квалификации (профессии, образовании, практическом опыте и т. д.) этих лиц. Раздел может быть дополнен перечнем обозначений и наименований документов, ознакомление с которыми необходимо поверителю для проведения поверки.

Раздел «*Требования безопасности*» содержит требования, соблюдение которых при поверке обеспечивает безопасность труда, производственную санитарию, охрану окружающей среды. При необходимости в раздел вводятся указания об отнесении поверки к работам с вредными или особо вредными условиями труда.

Раздел «*Условия поверки*» содержит перечень величин, которые необходимо нормировать при поверке вследствие их влияния на метрологические характеристики поверяемых средств измерений, с указанием номинальных значений влияющих величин и допускаемых отклонений от этих номинальных значений.

Раздел «Подготовка к поверке» содержит перечень работ, которые проводятся перед поверкой, и способы их выполнения.

Раздел «Проведение поверки» содержит подразделы:

- внешний осмотр;
- опробование;
- определение (контроль) метрологических характеристик.

Подраздел «Внешний осмотр» содержит перечень требований к поверяемым средствам измерений в части комплектности и внешнего вида.

Подраздел «Опробование» содержит перечень и описание операций, которые необходимо провести для проверки действия поверяемого средства измерений и взаимодействия его отдельных частей и элементов (в том числе прочности и электрического сопротивления изоляции, герметичности и т. п.).

Подраздел «Определение (контроль) метрологических характеристик» содержит описание операций, перечисленных в разделе «Операции поверки», и устанавливает наиболее рациональные методы определения (контроля) метрологических характеристик поверяемого средства измерений.

Описание каждой операции выделяется в отдельный пункт в последовательности, указанной в разделе «Операции поверки». Оно содержит наименование и метод поверки, схемы подключения, чертежи, указания о последовательности выполнения операции, формулы, графики, таблицы с пояснением входящих в них обозначений, указание о пределах допускаемой погрешности отсчета, рекомендации по числу значащих цифр, фиксируемых в протоколе и т. д. Если при выполнении поверки необходимо вести протокол записи результатов измерений (протокол поверки) по определенной форме, то на это указывается, а в приложении приводится форма протокола с указанием объема включаемых в него сведений. Если протокол допускается вести в произвольной форме, то это тоже должно быть зафиксировано.

В конце каждого пункта делается вывод о положительном или отрицательном результате операции поверки с указанием нормированных значений определяемой (контролируемой) метрологической характеристики средства измерений.

Раздел «Обработка результатов измерений» включается в документ по поверке при сложных способах обработки результатов измерений. Если способы обработки результатов измерений установлены в каком-либо нормативном документе, то приводится ссылка на этот документ.

Раздел «Оформление результатов поверки» содержит требования к оформлению результатов поверки. В нем указывается, что результаты поверки оформляются в соответствии с нормативным документом (например, ПР 50.2.006-94 «ГСИ. Порядок проведения поверки средств измерений») и устанавливаются способы оформления (свидетельство о поверке; нанесение оттиска поверительного клейма; внесение записи в паспорт или другой эксплуатационный документ средства измерений).

В качестве приложений к документу по поверке могут быть оформлены:

- программа обработки результатов измерений на персональном компьютере;
- методика расчета погрешности поверки;

- форма протокола записи результатов измерений, таблицы расчетных величин, графики зависимости величин и другие расчетные данные;
- пояснения терминов;
- методики приготовления аттестованных смесей и отбора проб;
- научно-техническое обоснование требований к параметрам методики поверки (пределу допускаемой погрешности поверки, контрольному допуску, по которому принимается решение о годности средства измерений, числу поверяемых точек, числу измерений в каждой поверяемой точке и т. д.);
- технические описания вспомогательных устройств и поверочных приспособлений;
- дополнительные сведения о поверяемых средствах измерений, основных и вспомогательных средствах поверки, стандартных образцах состава и свойств веществ и материалов;
- дополнительные особые указания о способах нанесения оттисков поверительных клейм;
- другие требования, способствующие исключению ошибок при поверке и повышению производительности поверочных работ, например указания по применению вычислительной техники.

6.4. Нормативно-правовая основа обеспечения единства измерений

6.4.1. Законодательная метрология

Нормативно-правовое обеспечение единства измерений представлено документами государственного, межгосударственного и международного уровней, межотраслевыми нормативно-техническими и методическими документами и нормативно-техническими и распорядительными документами субъектов хозяйственной деятельности (табл. 15). Все они объединяются общим понятием *законодательная метрология*.

Таблица 15

Уровень	Документы
Верхний	Государственные, межгосударственные, международные
Средний	Межотраслевые
Нижний	Субъектов хозяйственной деятельности

Государственными документами верхнего уровня являются:

- Конституция Российской Федерации;
- Закон Российской Федерации от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»;

- Указ Президента РФ от 02.01.2011 № 21 (в редакции от 01.03.2011) «О государственном метрологическом надзоре в области обороны и обеспечения безопасности Российской Федерации»;
- Постановление Правительства Российской Федерации от 12.02.1994 г. № 100 «Об организации работ по стандартизации, обеспечению единства измерений, сертификации продукции и услуг».

По Конституции Российской Федерации (статья 71) стандарты, эталоны, Метрическая система, исчисление времени находятся в ведении РФ.

Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» в редакции, принятой Государственной думой 11 июня 2008 г. и одобренной Советом Федерации 18 июня 2008 г., устанавливает основные положения обеспечения единства измерений в стране. *Сфера государственного регулирования* обеспечения единства измерений охватывает 17 направлений деятельности:

- 1) деятельность в области здравоохранения;
- 2) ветеринарная деятельность;
- 3) деятельность в области охраны окружающей среды;
- 4) деятельность по обеспечению безопасности при чрезвычайных ситуациях;
- 5) выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда;
- 6) осуществление производственного контроля за соблюдением установленных законодательством Российской Федерации требований промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта;
- 7) осуществление торговли и товарообменных операций, выполнение работ по расфасовке товаров;
- 8) выполнение государственных учетных операций;
- 9) оказание услуг почтовой связи и учет объема оказанных услуг электросвязи операторами связи;
- 10) деятельность в области обороны и безопасности государства;
- 11) геодезическая и картографическая деятельность;
- 12) деятельность в области гидрометеорологии;
- 13) проведение банковских, налоговых и таможенных операций;
- 14) выполнение работ по оценке соответствия промышленной продукции и продукции других видов, а также иных объектов установлены законодательством Российской Федерации обязательным требованиям;
- 15) проведение официальных спортивных соревнований, обеспечение подготовки спортсменов высокого класса;
- 16) выполнение поручений суда, органов прокуратуры, государственных органов исполнительной власти;
- 17) осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

За законом и принимаемыми в соответствии с ним актами законодательства РФ закреплено регулирование всех отношений, связанных с обеспечением единства измерений в этих сферах деятельности. В области международных от-

ношений приоритет отдается правилам международного договора, если они отличаются от тех, которые содержатся в законодательстве РФ об обеспечении единства измерений.

Закон устанавливает требования к измерениям, единицам величин, эталонам, стандартным образцам и средствам измерений, регламентирует такие *формы государственного регулирования* в области обеспечения единства измерений, как:

- утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений;
- поверка средств измерений;
- метрологическая экспертиза;
- государственный метрологический надзор;
- аттестация методик (методов) измерений;
- аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

Измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны выполняться по аттестованным методикам измерений, если методики измерений не включены в эксплуатационную документацию на средства измерений. Сведения об аттестованных методиках измерений хранятся в *Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений* и предоставляются заинтересованным лицам за исключением случаев, когда в интересах сохранения государственной, коммерческой, служебной и (или) иной охраняемой законом тайны доступ к документам, хранящимся в фонде, должен быть ограничен.

К применению в сфере государственного регулирования допускаются средства измерений утвержденного типа, прошедшие *поверку* и обеспечивающие соблюдение *обязательных требований* закона «Об обеспечении единства измерений» и законодательства Российской Федерации о техническом регулировании. Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования, *в добровольном порядке* могут подвергаться *калибровке*.

Законом вводятся основные метрологические *термины и определения* (см. глоссарий). Законодательно устанавливаются применение в Российской Федерации *Международной системы единиц* (см. п. 1.1.2) и *централизованного воспроизведения* их государственными эталонами (см. п.п. 2.1.1, 9.1–9.3), организационные основы обеспечения единства измерений (см. п. 1.3).

Виновные в нарушении законодательства Российской Федерации об обеспечении единства измерений несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

6.4.2. Международная система единиц

Совокупность единиц измерений называется *системой единиц*. Не во всех областях измерений системы единиц сформировались окончательно и закреплены соответствующими законодательными актами. Наилучшим образом в этом отношении обстоят дела в области измерения физических величин.

В физике общие правила конструирования систем единиц были сформулированы Гауссом в 1832 г. Они сводятся к следующему:

- 1) выбираются основные физические величины;
- 2) устанавливаются единицы основных физических величин. Для этого какому-либо размеру каждой основной физической величины приписывается числовое значение, равное 1. Выбор этого размера является произвольным и определяется исключительно соображениями удобства его использования в обиходе. Для обеспечения единства измерений все эти размеры, называемые *единицами основных физических величин*, должны быть закреплены законодательным путем. Обычно их называют просто *основными единицами*;
- 3) устанавливаются единицы производных физических величин, также называемые обычно просто *производными единицами*.

Пусть, например, производная физическая величина Q образуется путем перемножения двух основных величин A и B . Тогда, согласно выражению (4), значение Q можно выразить через значения A и B :

$$q[Q]=a[A]b[B],$$

а производная единица может быть выражена через основные единицы с помощью соотношения

$$[Q]=\frac{ab}{q}[A][B].$$

Если же производная величина Q образуется посредством деления основных величин A и B , то

$$q[Q]=\frac{a[A]}{b[B]},$$

и производная единица выражается через основные следующим образом:

$$[Q]=\frac{a}{qb}[A][B]^{-1}.$$

В общем случае производные единицы выражаются через основные с помощью степенного одночлена

$$[Q]=k [A]^{\alpha}[B]^{\beta}[\dots]^{\gamma} \dots,$$

где коэффициент пропорциональности k полагается безразмерным, а α , β , γ , ... оказываются тогда уже известными показателями размерности. В последнее время к коэффициенту k стали предъявлять еще одно требование: он должен равняться 1. Получаемые при этом условии так называемые *когерентные* или *согласованные* системы единиц являются наиболее простыми и удобными в обращении.

В том же 1832 г. Гауссом была предложена система единиц, названная им *абсолютной*, с основными единицами — миллиметр, миллиграмм, секунда. В дальнейшем по мере развития науки и техники возникали все новые и новые системы, пока их обилие не стало тормозом научно-технического прогресса. В этих условиях XI Генеральная конференция по мерам и весам в 1960 г. приняла Международную систему единиц физических величин, получившую у нас в стране сокращенное обозначение СИ (от слов *Systeme International* в полном названии *Le Systeme International d'Unites* — франц.). Последующими Генеральными конференциями по мерам и весам в первоначальный вариант СИ внесены некоторые изменения. В СНГ и странах Восточной Европы Международная система единиц является обязательной с 1 января 1980 г.

Основные единицы СИ приведены в табл. 16.

Производные единицы СИ (табл. 17) образуются из основных и дополнительных по правилам образования когерентных производных единиц, т. е. связаны с ними соотношением

$$[Q] = m^a \cdot kg^b \cdot s^c \dots$$

Некоторым из них даны названия в честь великих ученых: *ньютон, герц, паскаль, кулон, ом, сименс, тесла, беккерель* и др. Обозначения таких единиц, как международные, так и русские, пишутся с заглавной буквы — Н, Гц, Па, Кл, Ом, См, Тл, Бк и др.

Таблица 16. Основные единицы СИ

Величина		Единица			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Определение
			международное	русское	
Длина	L	метр	m	м	Метр равен расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299 792 458 долей секунды [XVI ГКМВ (1979 г.) и XVII ГКМВ (1983 г.)]
Масса	M	килограмм	kg	кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1889 г.) и III ГКМВ (1901 г.)]
Время	T	секунда	s	с	Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967 г.) Резолюция 1]

продолжение ↗

Таблица 16 (продолжение)

Величина		Единица			Определение
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		
			международное	русское	
Сила электрического тока	I	ампер	A	A	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н [МКМВ (1946 г.) Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948 г.)]
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	K	Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды [XIII ГКМВ (1967 г.) Резолюция 4]
Количество вещества	N	моль	mol	моль	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц [XIV ГКМВ (1971 г.) Резолюция 3]
Сила света	J	кандела	cd	кд	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср [XVI ГКМВ (1979 г.) Резолюция 3]

Таблица 17. Производные единицы СИ широкого распространения

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
1	2	3	4	5
1. Пространство и время				
Плоский угол	1	радиан	рад	рад
Телесный угол	1	стерадиан	sr	sr
Площадь	L ²	квадратный метр	m ²	m ²
Объем, вместимость	L ³	кубический метр	m ³	m ³
Скорость (линейная скорость)	LT ⁻¹	метр в секунду	m/s	м/с
Ускорение (линейное ускорение)	LT ⁻²	метр на секунду в квадрате	m/s ²	м/с ²
Угловая скорость	T ⁻¹	радиан в секунду	rad/s	рад/с
Угловое ускорение	T ⁻²	радиан на секунду в квадрате	rad/s ²	рад/с ²
2. Периодические и связанные с ними явления				
Частота периодического процесса (частота)	T ⁻¹	герц	Hz	Гц
Частота вращения	T ⁻¹	секунда в минус первой степени	s ⁻¹	с ⁻¹
Частота дискретных событий (импульсов, ударов)	T ⁻¹	секунда в минус первой степени	s ⁻¹	с ⁻¹

Определение

6

Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу

Стерерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

Квадратный метр равен площади квадрата, длины сторон которого равны 1 м

Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м

Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м

Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равномерно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменится на 1 м/с

Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающейся точки, при которой за время 1 с точка совершает поворот относительно оси вращения на угол 1 рад

Радиан на секунду в квадрате равен угловому ускорению равномерно вращающейся точки, при котором за время 1 с угловая скорость точки изменится на 1 рад/с

Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с совершается один цикл периодического процесса

Секунда в минус первой степени равна частоте равномерного вращения, при которой за время 1 с тело совершает один цикл вращения (один полный оборот)

Секунда в минус первой степени равна частоте дискретных событий (ударов, импульсов), при которой за время 1 с совершается одно дискретное событие

1	2	3	4	5	б
Круговая (циклическая) частота, угловая частота, пульсация	T^{-1}	секунда в минус первой степени	s^{-1}	s^{-1}	Секунда в минус первой степени равна угловой частоте, при которой за время 1 с совершается 2 π циклов вращения
Длина волны	L	метр	m	м	Метр равен длине волны, при которой частота колебаний 1 Гц соответствует скорости распространения волны 1 м/с
Волновое число	L^{-1}	метр в минус первой степени	m^{-1}	m^{-1}	Метр в минус первой степени равен волновому числу колебаний с длиной волны 1 м
3. Механика					
Плотность (плотность массы)	$L^{-3}M$	килограмм на кубический метр	kg/m^3	kg/m^3	Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м ³ равна 1 кг
Линейная плотность	$L^{-1}M$	килограмм на метр	kg/m	кг/м	Килограмм на метр равен линейной плотности тела, масса которого при длине 1 м равна 1 кг
Поверхностная плотность	$L^{-2}M$	килограмм на квадратный метр	kg/m^2	kg/m^2	Килограмм на квадратный метр равен поверхностной плотности тела, масса которого при площади поверхности 1 м ² равна 1 кг
Удельный объем	L^3M^{-1}	кубический метр на килограмм	m^3/kg	M^3/kg	Кубический метр на килограмм равен удельному объему однородного вещества, объем которого при массе 1 кг равен 1 м ³
Импульс (количество движения)	$LM T^{-1}$	килограмм-метр в секунду	$kg \cdot m/s$	кг·м/с	Килограмм-метр в секунду равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с
Момент инерции (динамический момент инерции)	L^2M	килограмм-метр в квадрате	$kg \cdot m^2$	$kg \cdot m^2$	Килограмм-метр в квадрате равен моменту инерции материальной точки массой 1 кг, находящейся на расстоянии 1 м от оси вращения
Сила	$LM T^{-2}$	ньютон	N	Н	Ньютоном равен силе, сообщаемой телу массой 1 кг ускорение 1 м/с ² в направлении действия силы. Ньютоном является также единицей веса и силы тяжести СИ
Вес					
Момент силы	$L^2 T M^{-1}$	ньютон-метр	$N \cdot m$	Н·м	Ньютоном-метр равен моменту силы, создаваемому силой 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы
Импульс силы	$LM T^{-1}$	ньютон-секунда	$N \cdot s$	Н·с	Ньютоном-секунда равна импульсу силы, вызываемому силой 1 Н, действующей в течение времени 1 с
Давление	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Pa	Па	Паскалем равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м ² , расположенной перпендикулярно действию силы
Нормальное механическое напряжение	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Pa	Па	Паскалем равен нормальному механическому напряжению, вызываемому упругой силой 1 Н, при равномерном ее распределении по сечению площадью 1 м, расположенному перпендикулярно действию силы

Модуль продольной упругости (модуль Юнга)	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Pa	Па	Паскаль равен модулю продольной упругости тела, испытывающего относительное удлинение, равное 1, при нормальном механическом напряжении 1 Па
Вязкость (динамическая вязкость)	$L^{-1}MT^{-3}$	паскаль-секунда	Pa·s	Па·с	Паскаль-секунда равна динамической вязкости среды, тангенциальное напряжение в которой при ламинарном движении и при разности скоростей слоев 1 м/с, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости, составляет 1 Па
Кинематическая вязкость	L^2T^{-1}	квадратный метр на секунду	m^2/s	m^2/c	Квадратный метр на секунду равен кинематической вязкости, при которой динамическая вязкость среды плотностью 1 kg/m^3 равна 1 Па·с
Поверхностное натяжение	MT^{-2}	Ньютоны на метр	N/m	Н/м	Ньютоны на метр равен поверхностному натяжению, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности
Работа Энергия Потенциальная энергия Кинетическая энергия	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж	Джоуль равен работе, совершаемой силой 1 Н при перемещении точки приложения силы на расстояние 1 м в направлении действия силы. Джоуль также является единицей энергии (кинетической, потенциальной) СИ
Удельная работа	L^2T^{-2}	джоуль на килограмм	J/kg	Дж/кг	Джоуль на килограмм равен удельной работе, совершаемой силой, приложенной к телу массой 1 кг, при которой работа силы равна 1 Дж
Мощность	L^2MT^{-3}	ватт	W	Вт	Ватт равен мощности, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж
Объемный расход; объемная подача насоса, компрессора, вентилятора	L^3T^{-1}	кубический метр в секунду	m^3/s	m^3/c	Кубический метр в секунду равен объемному расходу, при котором сквозь определенное сечение за время 1 с равномерно перемещается вещество объемом 1 m^3
Массовый расход; массовая подача насоса, компрессора, вентилятора	MT^{-1}	килограмм в секунду	kg/s	кг/с	Килограмм в секунду равен массовому расходу, при котором сквозь определенное сечение за время 1 с равномерно перемещается вещество массой 1 кг

4. Теплота

Температурный коэффициент: линейного расширения;	Θ^{-1}	кельвин в минус первой степени	K^{-1}	K^{-1}	Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту линейного расширения, при котором изменение температуры на 1 К (по отношению к температуре, принятой за начальную) вызывает относительное изменение длины, равное единице.
объемного расширения;	Θ^{-1}	кельвин в минус первой степени	K^{-1}	K^{-1}	Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту объемного расширения, при котором изменение температуры на 1 К (по отношению к температуре, принятой за начальную) вызывает относительное изменение объема, равное единице.
давления	Θ^{-1}	кельвин в минус первой степени	K^{-1}	K^{-1}	Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту давления, при котором изменение температуры на 1 К (по отношению к температуре, принятой за начальную) вызывает относительное изменение давления, равное единице

1	2	3	4	5	6
Температурный градиент	$L^{-1}\Theta$	кельвин на метр	K/m	К/м	Кельвин на метр равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м температура в направлении градиента температур меняется на 1 К
Количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж	Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж
Удельное количество теплоты	L^2T^{-2}	джоуль на килограмм	J/kg	Дж/кг	Джоуль на килограмм равен удельному количеству теплоты процесса, в котором к веществу массой 1 кг подводится (или отводится от него) количество теплоты 1 Дж
Теплоемкость	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$	джоуль на кельвин	J/K	Дж/К	Джоуль на кельвин равен теплоемкости тела, повышающего температуру на 1 К при сообщении ему количества теплоты 1 Дж
Удельная теплоемкость	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	джоуль на килограмм-кельвин	J/(kg×K)	Дж/(кг·К)	Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/(кг·К)
Тепловой поток	L^2MT^{-3}	ватт	W	Вт	Ватт равен тепловому потоку, при котором за 1 с подводится (или отводится) количество теплоты 1 Дж
Поверхностная плотность теплового потока	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	W/m ²	Вт/с	Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности теплового потока 1 Вт, равномерно распределенного по поверхности площадью 1 м ²
Теплопроводность	$LMT^{-3}\Theta^{-1}$	ватт на метр-кельвин	W/(m×K)	Вт/(м·К)	Ватт на метр-кельвин равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока 1 Вт/м устанавливается температурный градиент 1 К/м

5. Электричество и магнетизм

Электрический заряд (количество электричества)	TI	кулон	C	Кл	Кулон равен количеству электричества, проходящему сквозь поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с
Плотность (пространственная плотность) электрического заряда	$L^{-3}TI$	кулон на кубический метр	C/m ³	Кл/м ³	Кулон на кубический метр равен пространственной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный в пространстве объемом 1 м ³ , равен 1 Кл
Поверхностная плотность электрического заряда	$L^{-2}TI$	кулон на квадратный метр	C/m ²	Кл/м ²	Кулон на квадратный метр равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью 1 м ² , равен 1 Кл
Линейная плотность электрического заряда	$L^{-1}TI$	кулон на метр	C/m	Кл/м	Кулон на метр равен линейной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по линии длиной 1 м, равен 1 Кл
Плотность (поверхностная плотность) электрического тока	$L^{-2}I$	ампер на квадратный метр	A/m ²	А/м ²	Ампер на квадратный метр равен плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по поперечному сечению проводника площадью 1 м ² , равна 1 А
Линейная плотность электрического тока	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/m	А/м	Ампер на метр равен линейной плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по сечению тонкого листового проводника шириной 1 м, равна 1 А

Электрический потенциал Разность потенциалов; электрическое напряжение	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	В	Вольт равен электрическому потенциалу в данной точке электрического поля, при котором работа по перемещению положительного заряда 1 Кл по любой траектории из данной точки в точку с нулевым потенциалом равна 1 Дж. Вольт равен электрическому напряжению между двумя точками внутри проводника, при котором работа по перемещению положительного заряда 1 Кл по любой траектории между этими двумя точками равна 1 Дж
Электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	В	Вольт равен электродвижущей силе источника тока, при которой совершается работа сторонними силами по перемещению положительного заряда 1 Кл от отрицательного к положительному полюсу источника вдоль всей электрической цепи, равная 1 Дж
Напряженность электрического поля	$LMT^{-3}I^{-1}$	вольт на метр	V/m	В/м	Вольт на метр равен напряженности электрического поля, при которой поле действует на точечный заряд 1 Кл с силой 1 Н
Электрическая емкость (емкость)	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	F	Ф	Фарад равен электрической емкости конденсатора, при которой заряд 1 Кл создает между обкладками конденсатора напряжение 1 В
Электрическое (омическое) сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ω	Ом	Ом равен электрическому сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение 1 В при силе постоянного тока 1 А
Удельное электрическое сопротивление	$L^3MT^{-3}I^{-2}$	ом-метр	$\Omega \cdot m$	Ом·м	Ом-метр равен удельному электрическому сопротивлению материала проводника площадью поперечного сечения 1 м ² и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	сименс	S	См	Сименс равен электрической проводимости участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом
Удельная электрическая про- водимость	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	сименс на метр	S/m	См/м	Сименс на метр равен удельной электрической проводимости материала проводника, при которой удельное электрическое сопротивление материала проводника 1 Ом·м
Удельная электрическая про- водимость	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	сименс на метр	S/m	См/м	Сименс на метр равен удельной электрической проводимости материала проводника, при которой удельное электрическое сопротивление материала проводника 1 Ом·м
Магнитный поток (поток маг- нитной индукции)	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Wb	Вб	Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом сквозь поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл
Магнитная индукция; плот- ность магнитного потока	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	T	Тл	Тесла равна магнитной индукции, при которой сквозь поперечное сечение площадью 1 м ² , перпендикулярное направлению потока, проходит магнитный поток 1 Вб
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	H	Гн	Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб

1	2	3	4	5	6
6. Акустика					
Плотность звуковой энергии	$L^{-1}MT^{-2}$	джоуль на кубический метр	J/m^3	Дж/м ³	Джоуль на кубический метр равен плотности звуковой энергии в канале объемом 1 м ³ при звуковой энергии 1 Дж
Поток звуковой энергии (звуковая мощность)	L^2MT^{-3}	ватт	W	Вт	Ватт равен потоку звуковой энергии, при котором за время 1 с переносится звуковая энергия 1 Дж сквозь площадку, перпендикулярную к направлению распространения звуковых волн
Интенсивность звука	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	W/m^2	Вт/м ²	Ватт на квадратный метр равен интенсивности звука при потоке звуковой энергии 1 Вт и площади поперечного сечения канала 1 м ²
7. Оптическое излучение					
Плотность (объемная) энергии излучения	$L^{-1}MT^{-2}$	джоуль на кубический метр	J/m^3	Дж/м ³	Джоуль на кубический метр равен плотности лучистой энергии, при которой тело объемом 1 м ³ излучает энергию 1 Дж
Лучистая экспозиция	MT^{-2}	джоуль на квадратный метр	J/m^2	Дж/м ²	Джоуль на квадратный метр равен лучистой экспозиции, при которой на поверхность площадью 1 м ² падает излучение энергией 1 Дж
Поток излучения (лучистый поток; мощность излучения)	L^2MT^{-3}	ватт	W	Вт	Ватт равен потоку излучения, при котором за время 1 с излучается энергия 1 Дж
Плотность (поверхностная) потока излучения (лучистого потока) Излучательность	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	W/m^2	Вт/м ²	Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности потока излучения, при которой поверхность площадью 1 м ² излучает (или поглощает) поток излучения 1 Вт. Ватт на квадратный метр равен излучательной поверхности площадью 1 м ² при потоке излучения 1 Вт
Облученность	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	W/m^2	Вт/м ²	Ватт на квадратный метр равен облученности, при которой на поверхность площадью 1 м ² падает поток излучения 1 Вт
Сила излучения	L^2MT^{-3}	ватт на стерадиан	W/sr	Вт/ср	Ватт на стерадиан равен силе излучения точечного источника, излучающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт
Лучистость	MT^{-3}	ватт на стерадиан-квадратный метр	$W/(sr \cdot m^2)$	Вт/(ср·м ²)	Ватт на стерадиан-квадратный метр равен лучистости равномерно излучающей плоской поверхности площадью 1 м в перпендикулярном к ней направлении при силе излучения 1 Вт/ср
Световой поток	J	люмен	lm	лм	Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником силой света 1 кд в телесном угле, равном 1 ср
Световая энергия	TJ	люмен-секунда	lm·s	лм·с	Люмен-секунда равна световой энергии светового потока в 1 лм, действующего в течение времени 1 с
Яркость	$L^{-2}J$	кандела на квадратный метр	cd/m^2	кд/м ²	Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м ² при силе света 1 кд

Светимость	$L^{-2}J$	люмен на квадратный метр	lm/m^2	лм/м ²	Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью 1 м ² , испускающей световой поток 1 лм
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	lx	лк	Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м ² при падающем на нее световом потоке 1 лм
Световая экспозиция	$L^{-2}TJ$	люкс-секунда	lx·s	лк·с	Люкс-секунда равна световой экспозиции, создаваемой за время 1 с при освещенности 1 лк
Световая эффективность потока излучения (световой эквивалент лучистого потока)	$L^{-2}M^{-1}T^3J$	люмен на ватт	lm/W	лм/Вт	Люмен на ватт равен световой эффективности, при которой лучистому потоку 1 Вт соответствует световой поток 1 лм
8. Химия и молекулярная физика					
Молярная масса вещества	MN^{-1}	килограмм на моль	kg/mol	кг/моль	Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг
Молярный объем вещества	L^3N^{-1}	кубический метр на моль	m ³ /mol	м ³ /моль	Кубический метр на моль равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объем 1 м ³
Молярная внутренняя энергия	$L^2MT^{-2}N^{-1}$	джоуль на моль	J/mol	Дж/моль	Джоуль на моль равен молярной внутренней энергии вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль внутреннюю энергию 1 Дж
Молярная теплоемкость	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}N^{-1}$	джоуль на моль-кельвин	J/(mol·K)	Дж/(моль·К)	Джоуль на моль-кельвин равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкость 1 Дж/К
Концентрация (объемная) молекул	L^{-3}	метр в минус третьей степени	m ⁻³	м ⁻³	Метр в минус третьей степени равен концентрации (объемной) молекул, при которой в объеме 1 м ³ находится одна молекула
Массовая концентрация компонента	$L^{-3}M$	килограмм на кубический метр	kg/m ³	кг/м ³	Килограмм на кубический метр равен массовой концентрации компонента, при которой в объеме смеси (раствора, сплава) 1 м ³ содержится компонент массой 1 кг
Молярная концентрация компонента	$L^{-3}N$	моль на кубический метр	mol/m ³	моль/м ³	Моль на кубический метр равен молярной концентрации компонента в смеси (растворе, сплаве), при которой в объеме смеси (раствора, сплава) 1 м ³ содержится количество вещества 1 моль
Молярность раствора компонента	$M^{-1}N$	моль на килограмм	mol/kg	моль/кг	Моль на килограмм равен молярности раствора, при которой на массу растворителя 1 кг приходится количество растворимого вещества 1 моль
Энергия ионизирующего излучения	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж	Джоуль равен энергии ионизирующего излучения, эквивалентной работе 1 Дж
Скорость химической реакции	$L^{-3}T^{-1}N$	моль в секунду на кубический метр	mol/(s·m ³)	моль/(с·м ³)	Моль в секунду на кубический метр равен средней скорости одномолекулярной химической реакции, при которой за время 1 с молярная концентрация исходного вещества в растворе изменяется на 1 моль/м ³

9. Ионизирующие излучения

1	2	3	4	5	6
Поглощенная доза излучения	L ² T ⁻²	грей	Gy	Гр	Грей равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	L ² T ⁻³	грей в секунду	Gy/s	Гр/с	Грей в секунду равен мощности поглощенной дозы излучения, при которой за время 1 с облученным веществом поглощается доза излучения 1 Гр
Экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучений	M ⁻¹ T ¹	кулон на килограмм	C/kg	Кл/кг	Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе рентгеновского и гамма-излучений, при которой сопряженная кортцускулярная эмиссия в сухом атмосферном воздухе массой 1 кг производит ионы, несущие электрический заряд каждого знака, равный 1 Кл
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений	M ⁻¹ T ¹	ампер на килограмм	A/kg	A/kg	Ампер на килограмм равен мощности экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений, при которой за время 1 с сухому атмосферному воздуху передается экспозиционная доза излучения 1 Кл/кг
Эквивалентная доза излучения	L ² T ⁻²	зиверт	Sv	Зв	Зиверт равен эквивалентной дозе излучения, при которой поглощенная доза равна 1 Гр, и коэффициент качества излучения равен единице
Мощность эквивалентной дозы излучения	L ² T ⁻³	зиверт в секунду	Sv/s	Зв/с	Зиверт в секунду равен мощности эквивалентной дозы излучения, при которой за время 1 с облучаемым веществом поглощается эквивалентная доза излучения 1 Зв
Поток энергии ионизирующего излучения (мощность ионизирующего излучения)	L ² MT ⁻³	ватт	W	Вт	Ватт равен потоку энергии ионизирующего излучения, при котором за время 1 с передается столько энергии ионизирующего излучения 1 Дж
Интенсивность ионизирующего излучения (плотность потока энергии ионизирующего излучения)	MT ⁻³	ватт на квадратный метр	W/m ²	Вт/м ²	Ватт на квадратный метр равен интенсивности излучения, при которой на поверхность площадью 1 м ² падает излучение мощностью 1 Вт перпендикулярно этой поверхности
Активность нуклида (радиоактивного вещества)	T ⁻¹	беккерель	Bq	Бк	Беккерель равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит один акт распада
Удельная активность радиоактивного вещества	M ⁻¹ T ⁻¹	беккерель на килограмм	Bq/kg	Бк/кг	Беккерель на килограмм равен удельной активности, при которой на массу 1 кг радиоактивного вещества приходится активность, равная 1 Бк
Объемная активность радиоактивного вещества	L ⁻³ T ⁻¹	беккерель на кубический метр	Bq/m ³	Бк/м ³	Беккерель на кубический метр равен объемной активности, при которой на объем 1 м ³ , занимаемый радиоактивным веществом, приходится активность 1 Бк
Молярная активность радиоактивного вещества	T ⁻¹ N ⁻¹	беккерель на моль	Bq/mol	Бк/моль	Беккерель на моль равен молярной активности, при которой на количество вещества радионуклида 1 моль приходится активность 1 Бк

Десятичные кратные и дольные единицы образуются с помощью множителей и приставок, наименования, происхождение и обозначения которых приведены в табл. 18.

Таблица 18

Множитель	Приставка				
	Наименование	Происхождение		Обозначение	
		от какого слова	от какого слова	международное	русское
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{18}$	Экса	Шесть (раз по 10^3)	Греч.	Е	Э
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{15}$	Пета	Пять (раз по 10^3)	То же	Р	П
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	Тера	Огромный	То же	Т	Т
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	Гига	Гигант	То же	G	Г
$1\ 000\ 000 = 10^6$	Мега	Большой	То же	М	м
$1000 = 10^3$	Кило	Тысяча	То же	К	к
$100 = 10^2$	Гекто	Сто	То же	h	г
$10 = 10^1$	Дека	Десять	То же	da	да
$0,1 = 10^{-1}$	Деци	Десять	Лат.	d	д
$0,01 = 10^{-2}$	Санти	Сто	То же	c	с
$0,001 = 10^{-3}$	Милли	Тысяча	То же	m	м
$0,000001 = 10^{-6}$	Микро	Малый	Греч.	μ	мк
$0,0000000001 = 10^{-9}$	Нано	Карлик	Лат.	n	н
$0,00000000000001 = 10^{-12}$	Пико	Пикколо (маленький)	Итал.	P	п
$0,0000000000000001 = 10^{-15}$	Фемто	Пятнадцать	Дат.	f	ф
$0,000000000000000001 = 10^{-18}$	Атто	Восемнадцать	То же	a	а

К наименованию единицы допускается присоединять только одну приставку (например, пикофарада, а не микропикофарада). У единиц, образованных как произведение или отношение нескольких единиц, приставку присоединяют, как правило, к наименованию первой единицы, например килопаскаль секунда на метр (кПа · с/м), а не паскаль-килосекунда на метр. Кратные и дольные единицы выбирают обычно таким образом, чтобы числовое значение величины находилось в диапазоне от 0,1 до 1000 (например, для длины $\ell = 7,5 \cdot 10^{-5}$ м = = 75 мкм = 0,075 мм = 75 000 нм следует выбрать 75 мкм, так как в других случаях числовое значение выходит за пределы указанного диапазона). От этого

правила отступают только при составлении таблиц числовых значений одной и той же величины или при сопоставлении этих значений в одном тексте, а также в тех областях, где традиционно применяется конкретная единица (например, линейные размеры на машиностроительных чертежах всегда выражаются в миллиметрах).

6.5. Организационная основа обеспечения единства измерений

Деятельность по обеспечению единства измерений осуществляется:

- уполномоченными на то федеральными органами исполнительной власти;
- государственными научными метрологическими институтами;
- государственными региональными центрами метрологии;
- Государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли, Государственной службой стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов, Государственной службой стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов;
- метрологическими службами федеральных органов исполнительной власти;
- метрологическими службами юридических лиц и индивидуальными предпринимателями.

6.5.1. Государственные службы обеспечения единства измерений

Структура государственных служб обеспечения единства измерений показана на рис. 119.

На федеральном уровне государственное регулирование обеспечением единства измерений осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) в соответствии с Положением, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2004 г. № 294. Непосредственно этой деятельностью занимаются находящиеся в ведении Росстандарта государственные службы обеспечения единства измерений:

- Государственная метрологическая служба (ГМС), состоящая из 7 научных метрологических институтов и 106 региональных центров метрологии;
- Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ);
- Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО);
- Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

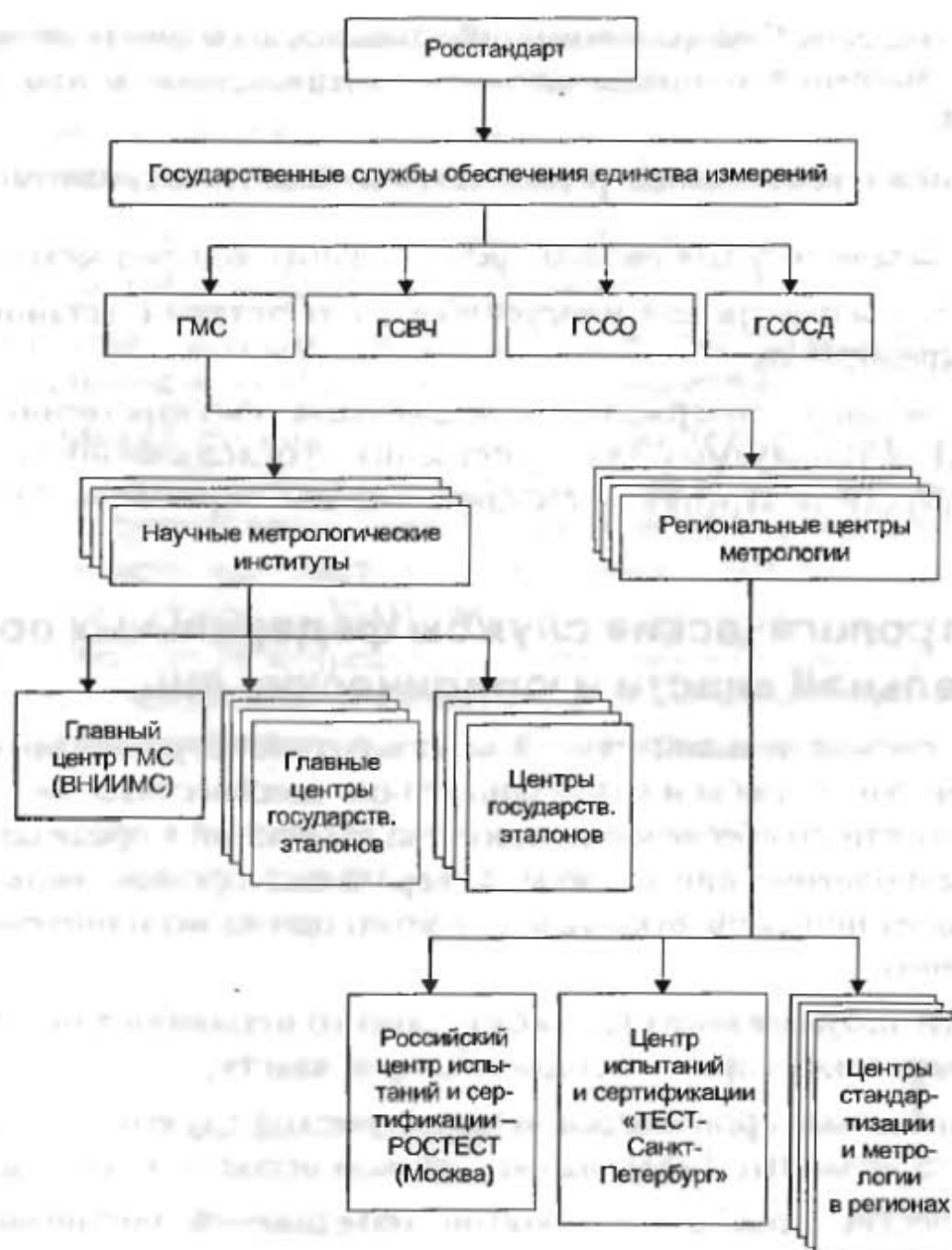


Рис. 119. Структура государственных служб обеспечения единства измерений

Основными задачами государственных научных метрологических институтов являются:

- 1) проведение фундаментальных и прикладных научных исследований, экспериментальных разработок и осуществление научно-технической деятельности в области обеспечения единства измерений;
- 2) разработка, совершенствование, содержание, сличение и применение государственных первичных эталонов единиц СИ;
- 3) передача информации о размерах единиц СИ от государственных первичных эталонов вторичным эталонам;
- 4) участие в разработке проектов нормативных документов в области обеспечения единства измерений;
- 5) проведение обязательной метрологической экспертизы содержащихся в проектах нормативных правовых актов Российской Федерации требований к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений;

- 6) создание и ведение Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений и предоставление содержащихся в нем документов и сведений;
- 7) участие в международном сотрудничестве в области метрологии.

Основные задачи государственных региональных центров метрологии:

- 1) проведение поверки средств измерений в соответствии с установленной областью аккредитации;
- 2) совершенствование, содержание и применение государственных эталонов единиц СИ, используемых для обеспечения прослеживаемости других эталонов и средств измерений к государственным первичным эталонам единиц СИ.

6.5.2. Метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц

Федеральные органы исполнительной власти создают в установленном порядке метрологические службы и (или) определяют должностных лиц для организации деятельности по обеспечению единства измерений в пределах своей компетенции. Метрологические службы федеральных органов исполнительной власти создаются приказом руководителя этого органа исполнительной власти и могут включать:

- структурные подразделения (службу) главного метролога в центральном аппарате федерального органа исполнительной власти;
- головные и базовые организации метрологической службы в отраслях и подотраслях, назначаемые федеральным органом исполнительной власти;
- метрологические службы предприятий, объединений, организаций, учреждений.

Права и обязанности метрологических служб федеральных органов исполнительной власти, порядок организации и координации их деятельности определяются положениями о метрологических службах, утверждаемыми руководителями федеральных органов исполнительной власти по согласованию с Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии.

Метрологические службы юридических лиц решают следующие задачи:

- обеспечение единства и требуемой точности измерений, необходимого уровня метрологического обеспечения производства;
- внедрение современных методов и средств измерений с целью повышения уровня научных исследований;
- организация и проведение калибровки и ремонта средств измерений, находящихся в эксплуатации;
- надзор за состоянием и применением средств измерений, эталонов единиц СИ, методик выполнения измерений, за соблюдением метрологических правил, норм и требований нормативных документов по обеспечению единства измерений;

- выдача обязательных предписаний, направленных на предотвращение или устранение нарушений метрологических правил, требований и норм;
- проверка своевременности представления средств измерений на испытания в целях утверждения типа, а также на поверку и калибровку;
- анализ состояния измерений, испытаний и контроля на предприятии;
- проведение метрологической аттестации методик выполнения измерений;
- взаимодействие с другими подразделениями предприятия по вопросам обеспечения единства и требуемой точности измерений.

Метрологические службы аккредитуются на техническую компетентность в области обеспечения единства измерений. Головные и базовые организации должны быть аккредитованы соответствующими федеральными органами исполнительной власти при участии специалистов — метрологов. Главный центр метрологической службы — ВНИИМС — осуществляет научно-методическое руководство работами по аккредитации головных и базовых организаций и ведет регистрацию головных и базовых организаций метрологических служб федеральных органов исполнительной власти и объединений юридических лиц.

Глоссарий

Аттестация методик (методов) измерений — исследование и подтверждение соответствия методик (методов) измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям.

Ввод в эксплуатацию средств измерений — документально оформленная в установленном порядке готовность средств измерений к использованию по назначению.

Государственный метрологический надзор — контрольная деятельность в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, осуществляемая уполномоченными федеральными органами исполнительной власти и заключающаяся в систематической проверке соблюдения установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований, а также в применении установленных законодательством Российской Федерации мер за нарушения, выявленные во время надзорных действий.

Государственный первичный эталон единицы величины — государственный эталон единицы величины, обеспечивающий воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей в Российской Федерации точностью, утверждаемый в этом качестве в установленном порядке и применяемый в качестве исходного на территории Российской Федерации.

Государственный эталон единицы величины — эталон единицы величины, находящийся в федеральной собственности.

Единица величины — фиксированное значение величины, которое принято за единицу данной величины и применяется для количественного выражения однородных с ней величин.

Единство измерений — состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Измерение — совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины.

Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа — работы по определению метрологических и технических характеристик однотипных стандартных образцов или средств измерений.

Калибровка средств измерений — совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений.

Методика (метод) измерений — совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Метрологическая служба — организующее и (или) выполняющее работы по обеспечению единства измерений и (или) оказывающее услуги по обеспечению единства измерений структурное подразделение центрального аппарата федерального органа исполнительной власти и (или) его территориального органа, юридическое лицо или структурное подразделение юридического лица либо объединения юридических лиц, работники юридического лица, индивидуальный предприниматель.

Метрологическая экспертиза — анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе. Метрологическая экспертиза проводится в обязательном (обязательная метрологическая экспертиза) или добровольном порядке.

Метрологические требования — требования к влияющим на результат и показатели точности измерений характеристикам (параметрам) измерений, эталонов единиц величин, стандартных образцов, средств измерений, а также к условиям, при которых эти характеристики (параметры) должны быть обеспечены.

Обязательные метрологические требования — метрологические требования, установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и обязательные для соблюдения на территории Российской Федерации.

Передача единицы величины — приведение единицы величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

Поверка средств измерений (далее также — поверка) — совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

Прослеживаемость — свойство эталона единицы величины или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений.

Прямое измерение — измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средств измерений.

Сличение эталонов единиц величин — совокупность операций, устанавливающих соотношение между единицами величин, воспроизводимых эталонами единиц величин одного уровня точности и в одинаковых условиях.

Средство измерений — техническое средство, предназначенное для измерений.

Стандартный образец — образец вещества (материала) с установленными по результатам испытаний значениями одной и более величин, характеризующих состав или свойство этого вещества (материала).

Технические системы и устройства с измерительными функциями — технические системы и устройства, которые наряду с их основными функциями выполняют измерительные функции.

Технические требования к средствам измерений — требования, которые определяют особенности конструкции средств измерений (без ограничения их технического совершенствования) в целях сохранения их метрологических характеристик в процессе эксплуатации средств измерений, достижения достоверности результата измерений, предотвращения несанкционированной настройки и вмешательства, а также требования, обеспечивающие безопасность и электромагнитную совместимость средств измерений.

Тип средств измерений — совокупность средств измерений, предназначенных для измерений одних и тех же величин, выраженных в одних и тех же единицах величин, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации.

Тип стандартных образцов — совокупность стандартных образцов одного и того же назначения, изготавливаемых из одного и того же вещества (материала) по одной и той же технической документации.

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений — документально оформленное в установленном порядке решение о признании соответствия типа стандартных образцов или типа средств измерений метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) на основании результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа.

Фасованные товары в упаковках — товары, которые упаковываются в отсутствие покупателя, при этом содержимое упаковки не может быть изменено без ее вскрытия или деформирования, а масса, объем, длина, площадь или иные величины, определяющие количество содержащегося в упаковке товара, должны быть обозначены на упаковке.

Эталон единицы величины — техническое средство, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины.

Библиографический список

1. *Шишкин И. Ф.* Основы метрологии, стандартизации и контроля качества: Учеб. пособие. — М.: Изд-во стандартов, 1988.
2. *Шишкин И. Ф.* Метрология, стандартизация и управление качеством: Учебник для вузов / Под ред. Н. С. Соломенко. — М.: Изд-во стандартов, 1990.
3. *Шишкин И. Ф.* Теоретическая метрология: Учебник для вузов. — М.: Изд-во стандартов, 1991.
4. *Шишкин И. Ф.* Теоретическая метрология. Ч. 1: Общая теория измерений: Учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Питер, 2010.
5. *Фридман А. Э.* Основы метрологии: современный курс. — СПб.: Профессионал, 2008.

Предметный указатель

А

Аттестация методики измерения, 197

Б

Брак поверки, 145

Г

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, 161

Государственный первичный эталон единицы длины, 164

Государственный первичный эталон единицы массы, 165

Государственный первичный эталон единицы силы постоянного электрического тока, 169

Государственный первичный эталон единицы силы света, 167

Д

Декодирование, 100

Детектирование, 97

Динамические звенья
второго порядка, 42
аперiodическое, 42
колебательное, 42
консервативное, 42
первого порядка, 40
аперiodическое, 41
дифференцирующее, 41
задерживающее, 40
интегрирующее, 41
усилительное, 40

Динамические характеристики средств измерений
полные, 52
частные, 52

Е

Единство измерений, 175

З

Законодательная метрология, 213

И

Измерение
направления (целенгование), 106
по максимуму принимаемого сигнала, 107
по минимуму принимаемого сигнала, 113
фазовым методом, 116
расстояния, 117
импульсным методом, 118
триангуляционным методом, 117
фазовым методом, 121
частотным методом, 119
скорости, 122
Измерения
динамические, 52
статические, 52
Испытания средств измерений, 132
единичного производства, 133
серийного производства, 133

К

- Калибровка средств измерений, 134
- Квантовая метрология, 179
 - квантовый эффект Холла, 182
 - нестационарный эффект Джозефсона, 181
 - стационарный эффект Джозефсона, 181
- Ключевые сличения международного комитета по мерам и весам, 187
- региональных метрологических организаций, 191
- Кодирование, 72

М

- Международная система единиц, 215
- Международная температурная шкала МТШ-90, 170
- Метод решения уравнений динамики
 - классический, 25
 - операторный, 27
 - спектральный, 33
- Метрологическая надежность средств измерений, 14
- Метрологические характеристики средств измерений, 7
- Модуляция
 - амплитудная, 80
 - импульсная, 86
 - кодово-импульсная, 89
 - фазовая, 84
 - частотная, 83

Н

- Нормирование метрологических характеристик средств измерений, 9

О

- Обеспечение единства измерений, 175
 - методическая основа, 194
 - документы на методики проверки, 210
 - методика измерений, 194
 - методика измерений, индивидуальная, 195
 - методика измерений, типовая, 195
 - порядок проведения испытаний средств измерений, 204

Обеспечение единства измерений (продолжение)

- Нормативно-правовая основа, 213
- организационная основа, 228
 - государственные службы обеспечения единства измерений, 228
 - метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц, 230
- техническая основа, 176
 - децентрализованное воспроизведение единиц, 186
 - централизованное воспроизведение единиц, 176
- Опорное значение эталонной меры, 189

П

- Проверка средств измерений без использования результатов калибровки, 143
 - внеочередная, 145
 - инспекционная, 146
 - обязательная, 145
 - первичная, 145
 - периодическая, 145
- с использованием результатов калибровки, 142
 - экспертная, 146
- Прослеживаемость эталонов и средств измерений, 155

Р

- Режимы работы локационной системы, 124
 - измерение, 128
 - обнаружение, 124
- средств измерений, 21
 - нестационарный, 48
 - оптимальная фильтрация, 63
 - переходный, 23
 - стационарный, 47
 - установившийся, 21

С

- Соединение типовых динамических звеньев
 - параллельное, 43
 - последовательное, 43
 - с обратной связью, 44

- Средства измерений, 5
 - вещественные меры, 6
 - измерительные преобразователи, 6
 - измерительные приборы, 7
 - измерительные системы, 7
 - измерительные установки, 7
 - индикаторы, 5
 - стандартные образцы, 7
 - технические системы и устройства с измерительными функциями, 7
- Степень децентрализации воспроизведения единиц, 193
- Степень эквивалентности национальных шаблонов, 190
- Схема передачи информации о размере единицы
 - государственная, 152
 - локальная, 147

Т

- Теорема
 - Котельникова, 70
 - разложения, 45

Ф

- Формула
 - Лагранжа, 104
 - Шеннона, 93

- Фундаментальные физические константы, 185
- Функция представления измерительной информации
 - аналоговая, 67
 - дискретная, 67

Ч

- Число ступеней в схеме передачи информации о размере единицы
 - максимальное, 155
 - минимальное, 153

Э

- Эталон, 159
 - встроенный, 193
 - вторичный, 159
 - копия, 159
 - свидетель, 160
 - сравнения, 159
 - государственный (национальный), 160
 - первичный, 160
 - специальный, 160
 - групповой, 161
 - межгосударственный, 160
 - международный, 160
 - одиночный, 161
 - рабочий, 159
 - эталонный набор, 161

Игорь Федорович Шишкин
Теоретическая метрология
Часть 2. Обеспечение единства измерений:
Учебник для вузов. 4-е издание

Заведующий редакцией

А. Кривоцов

Руководитель проекта

А. Кривоцов

Ведущий редактор

Ю. Сергиенко

Художественный редактор

Л. Адуевская

Корректоры

В. Листова, Н. Перишаква

Верстка

Л. Харитонов

ООО «Мир книг», 198206, Санкт-Петербург, Петергофское шоссе, 73, лит. А29.

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК 005-93, том 2; 95 3005 — литература учебная.

Подписано в печать 29.07.11. Формат 70x100/16. Усл. п. л. 19,350. Тираж 1000. Заказ 4966.

Отпечатано по технологии СТР в ИПК ООО «Ленинградское издательство».

194044, Санкт-Петербург, ул. Менделеевская, д. 9.

Телефон / факс: (812) 495-56-10.



SALD

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ
АНТИВИРУСНАЯ
ЛАБОРАТОРИЯ
ДАНИЛОВА

www.SALD.ru
8 (812) 336-3739

АНТИВИРУСНЫЕ
ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ



Шишкин Игорь Федорович — д. т. н., почетный профессор Северо-Западного государственного технического университета, президент Международной профессорской ассоциации, действительный член (академик) РАН, Метрологической академии РФ, Петровской академии наук и искусств, Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации. За выдающиеся заслуги во благо России занесен в «Золотую Книгу Отечества» в номинации «Наука».

Много сделал для становления высшего метрологического образования в стране. За создание новой инженерной специальности «Метрология, стандартизация и управление качеством» в 1988 году награжден Почетной грамотой Госстандарта СССР.

На протяжении многих лет руководил деятельностью Научно-методического совета Госкомвуза СССР

по этой специальности. Написал первые учебники по профилирующим дисциплинам новой специальности: «Теоретическая метрология», «Прикладная метрология», «Квалиметрия и управление качеством».

Во второй части учебника излагаются основы теории обеспечения единства измерений в свете последней редакции Закона РФ «Об обеспечении единства измерений» от 26 июня 2008 года № 102-ФЗ.

Уделяется внимание возможности обеспечения единства измерений при децентрализованном воспроизведении единиц. Книга предназначена для студентов, обучающихся по специальностям 200501.65 «Метрология и метрологическое обеспечение», 200503.65 «Стандартизация и сертификация» и направлению подготовки магистров и бакалавров 200500.62 «Метрология, стандартизация и сертификация», и может использоваться студентами других технических специальностей и направлений подготовки, изучающими метрологию в составе общепрофессиональных дисциплин. Учебник также будет полезен сотрудникам государственной метрологической службы и работникам метрологических служб государственных органов управления Российской Федерации и юридических лиц, ученым и специалистам на производстве, занимающимся измерениями.

Рекомендовано Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Метрология, стандартизация и сертификация» и специальностям «Метрология и метрологическое обеспечение», «Стандартизация и сертификация».

ISBN 978-5-459-00910-1



9 785459 009101

ПИТЕР®

Заказ книг:

197198, Санкт-Петербург, а/я 127
тел.: (812) 703-73-74, postbook@piter.com

61093, Харьков-93, а/я 9130
тел.: (057) 758-41-45, 751-10-02, piter@kharkov.piter.com

www.piter.com — вся информация о книгах и веб-магазин