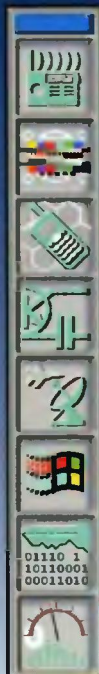


УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ДЛЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ



Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах



С. И. Боридько, Н. В. Дементьев,
Б. Н. Тихонов, И. А. Ходжаев

**С. И. Борицько, Н. В. Дементьев,
Б. Н. Тихонов, М. А. Ходжаев**

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах

*Допущено УМО по образованию в области
информационной безопасности в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 090106 (075600) –
«Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»*

Москва
Горячая линия – Телеком
2007

УДК 621.372
ББК 32.842
М54

Авторы: С. И. Борицько, Н. В. Дементьев, Б. Н. Тихонов, И. А. Ходжаев

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор А. П. Фисун; кафедра систем информационно-телеметрического и метрологического обеспечения ВА РВСН им. Петра Великого

**М54 Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. Учебное пособие / Под общей редакцией Б. Н. Тихонова – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 374, с.: ил.
ISBN 5-93517-338-7.**

Рассмотрены основы метрологии, методы и средства электрорадиоизмерений, вопросы калиметрии, стандартизации и оценивания соответствия. Рассмотрены вопросы автоматизации измерений, а также оценивание и поддержание качества радиоэлектронных изделий в процессе эксплуатации. Материал соответствует требованиям действующих нормативных документов в области метрологии, стандартизации, сертификации и технического регулирования, а также современным тенденциям развития теории измерений и измерительной техники.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 090106 (075500) – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», будет полезно студентами, обучающимися по направлениям «Телекоммуникации» и «Радиотехника» и специалистам.

ББК 32.842

Адрес издательства в Интернет www.techbook.ru

Учебное издание

**Борицько Сергей Иванович, Дементьев Николай Васильевич,
Тихонов Борис Николаевич, Ходжаев Ильмир Абдуллаевич,**

МЕТРОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Учебное пособие

Редактор Ю. Н. Чернышев
Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова
Обложка художника В. Г. Сетина

ЛР № 071825 от 20 марта 1999 г. Подписано в печать 20.08.06. Формат 60 × 90/16.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 23,5. Тираж 2000 экз. Изд. №6338. Заказ № 7031.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО ордена «Знак Почета»
«Смоленская областная типография им. В. И. Смирнова».
214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.

ISBN 5-93517-338-7

© С. И. Борицько, Н. В. Дементьев,
Б. Н. Тихонов, И. А. Ходжаев,
2007
© Оформление издательства
«Горячая линия»–Телеком, 2007

Предисловие

Активное внедрение радиоэлектроники во все сферы человеческой деятельности неизбежно сопровождается расширением потребностей в электрорадиотехнических измерениях. Трудно представить современные сложные радиоэлектронные изделия, которые можно разрабатывать и эксплуатировать без проведения измерений, необходимых для оценивания их качества и технического состояния. Более того, производство и эксплуатация новой современной радиоэлектронной аппаратуры во многих случаях предполагает опережающее развитие новых, более совершенных методов и средств измерений для оценивания технологических и эксплуатационных показателей этой аппаратуры.

Электрорадиотехнические измерения находят широкое применение в телекоммуникационных системах при оценивании технического состояния радиоэлектронных устройств, качества приема, обработки, защиты и передачи информации с использованием технических средств, а также на объектах информатизации при инструментальном оценивании эффективности защиты информации. Для подготовки специалистов по вопросам метрологического обеспечения и радиотехнических измерений в указанных областях и предназначено настоящее учебное пособие.

Структура изложения учебного материала соответствует задаче системной подготовки специалистов по специальности 075600 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» и учебной дисциплине «Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах».

Учебное пособие состоит из трех частей, включающих 17 глав. Учебный материал подготовлен коллективом авторов: С.И. Борицько, Н.В. Дементьевым, Б.Н. Тихоновым, И.А. Ходжаевым. Общее редактирование проведено Б.Н. Тихоновым.

В первой части пособия рассматриваются вопросы общей метрологии. Во второй части излагаются основные методы и средства радиотехнических измерений. Третья часть учебного пособия посвящена основам калиметрии, технического регулирования, стандартизации и сертификации.

В настоящее время в Российской Федерации по вопросам обеспечения единства измерений, технического регулирования, стандартизации, сертификации внедряются новые нормативные документы. В связи с этим взгляды на указанные вопросы еще не полностью установились и в ближайшие годы могут уточняться. Понимая это, авторы все-таки старались при изложении учебного материала учесть появившиеся и внедряющиеся в теоретическую и прикладную метрологию новации. Учитывались также рекомендации международных организаций в области

метрологии, стандартизации и сертификации. Авторы с глубокой благодарностью примут любые замечания и пожелания и при необходимости учтут их при последующей переработке учебного материала.

Авторы благодарят О.Л. Ходжаеву и за помощь при подготовке рукописи к изданию.

ЧАСТЬ I

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

Физические величины, средства и методы их измерения

1.1. Физические величины. Единицы величин

В окружающем человека мире существует большое количество различных объектов, явлений, процессов. Для отличия одного объекта (явления, процесса) от другого или нахождения их общности используют некоторую качественную философскую категорию, называемую свойством объекта. Для количественного описания свойств объектов используют понятие «величина», которая не существует сама по себе, а только совместно с объектом, обладающим этими свойствами. Различают физические величины, свойственные материальным объектам, и нефизические величины, свойственные нематериальным объектам (явлениям, процессам), рассматриваемым, например, в социологии, философии.

Физическая величина — это свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

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

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

Размер физической величины — это некоторое количественное содержание физической величины, присущее конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Истинный размер физической величины существует объективно, независимо от того, знаем мы его или нет (например, сопротивление конкретного проводника или ток в конкретной электрической цепи).

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

величины — это количественная оценка размера физической величины, представленная в виде некоторого числа принятых для нее единиц (например, значение сопротивления проводника 5 Ом или значение силы тока 8 А).

Различают *истинное* значение физической величины, идеально отражающее свойство объекта, *действительное*, найденное экспериментально, достаточно близкое к истинному значению, которое можно использовать вместо него, и *измеренное* значение, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерения.

Совокупность величин, связанных между собой зависимостями, образуют *систему физических величин*, в которой имеются основные и производные величины. Основная физическая величина — это величина, входящая в систему и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы. *Производная физическая величина* — это величина, входящая в систему и определяемая через основные величины этой системы.

Важной характеристикой физической величины является ее *размерность* ($\dim$). Размерность — это выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным единице.

Размерность основной величины относительно самой себя равна единице, т.е. формула размерности основной величины совпадает с ее символом. Например: размерность длины $\dim l = L$; размерность массы $\dim m = M$; размерность времени $\dim t = T$.

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

Конкретная размерность производных величин определяется на основе соответствующих уравнений физики (см. приложение 1). Например, мощность — физическая величина (P), характеризующая скорость совершения работы A за интервал времени t : $P = A/t$. Учитывая, что работа A равна произведению силы F на элементарное перемещение l ($A = Fl$), а сила $F = ma$, где m — масса, a — ускорение ($\dim a = l/t^2$), получаем

$$P = \frac{ml^2}{t^3}, \quad \dim P = L^2 MT^{-3}.$$

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

Величина называется *безразмерной*, если в ее размерность входят основные величины в степени с показателем, равным нулю. Безразмерные (относительные) величины представляют собой отношение данной

физической величины к одноименной, применяемой в качестве исходной (например, коэффициент трансформации).

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

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

Квазидетерминированная физическая величина — это величина, для которой известен вид зависимости от времени, но не известен измеряемый параметр этой зависимости. *Случайная физическая величина* — величина, размер которой изменяется во времени случайным образом.

Физические величины делят на активные и пассивные. *Активные величины* (например, ЭДС источника электрического тока) способны без вспомогательных источников энергии создавать сигналы измерительной информации. *Пассивные величины* (например, электрическое сопротивление) сами не могут создавать сигналы измерительной информации. Для этого их нужно активизировать с помощью вспомогательных источников энергии.

Числовые значения измеряемых физических величин зависят от используемых единиц измерений этих величин. *Единица физической величины* — это конкретная физическая величина, определенная и принятая по соглашению, с которой сравниваются другие величины того же рода.

Чтобы избежать произвола в результатах измерений, т.е. обеспечить единство измерений, единицы физических величин устанавливаются по определенным правилам и закрепляются законодательным путем. Исторически сложилось так, что единицы физических величин объединяются в системы. *Система единиц физических величин* — это совокупность основных и производных единиц, относящихся к некоторой системе величин, образованная в соответствии с принятыми принципами. В России в установленном порядке допускаются к применению единицы величин Международной системы единиц (СИ), принятой Генеральной конференцией по мерам и весам, рекомендованные Международной организацией законодательной метрологии.

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

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

Метр — длина пути, проходимая светом в вакууме за интервал времени $1/299792458$ доли секунды.

Килограмм — единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.

Секунда — время, равное 9192631770 периодам излучения, соответствующим переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома Цезия-133.

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

Кельвин — единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Предусмотрены также две дополнительные единицы.

Радян — угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Стерadian — телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

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

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

Например, единица мощности, выраженная через единицы СИ, $1 \text{ Вт} = \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$. Основные и некоторые производные единицы СИ, используемые в электротехнике, приведены в приложении 1.

Наряду с единицами СИ Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» допускает применение *внесистемных единиц*, т.е. единиц, не входящих ни в одну из существующих систем. Принято выделять несколько видов внесистемных единиц:

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

К числу внесистемных относят также кратные и дольные единицы измерения, имеющие иногда собственные наименования, например единица массы — тонна (т). В общем случае десятичные, кратные и дольные единицы образуются с помощью множителей и приставок. Наименования и обозначения множителей и приставок приведены в приложении 2.

1.2. Воспроизведение и хранение информации о размерах единиц физических величин

Решение одной из основных задач метрологии — обеспечение единства измерений достигается как за счет точного воспроизведения, хранения и передачи размеров установленных единиц физических величин, так и за счет применяемых средств измерения.

Единицы физических величин в настоящее время воспроизводят с помощью специальных технических средств, называемых эталонами.

Эталон единицы величины — это средство измерений, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины.

Эталоны единиц классифицируют по ряду признаков (рис. 1.1); по точности воспроизведения единиц и подчиненности различают первичные, вторичные и специальные эталоны. По назначению вторичные эталоны разделяют на эталоны-копии, эталоны сравнения, эталоны-свидетели и рабочие эталоны.

Международный эталон принимается по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами. Например, международный прототип килограмма.

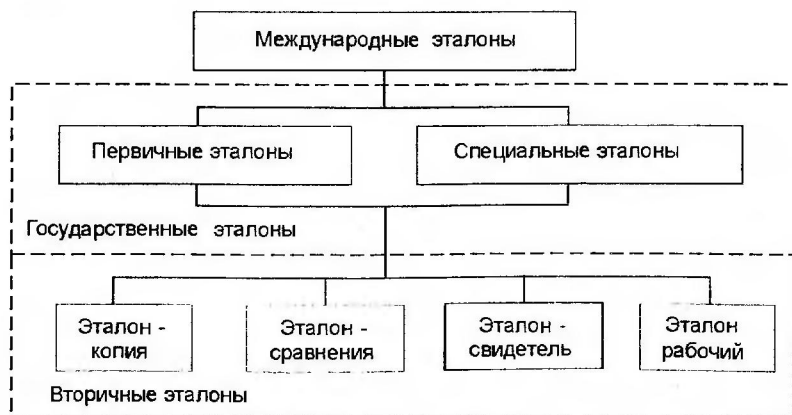


Рис. 1.1. Классификация эталонов

Первичным называется эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью.

Специальный эталон обеспечивает воспроизведение единицы величины в особых условиях, когда прямую передачу размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью технически реализовать невозможно. Он заменяет для этих условий первичный эталон.

Официально утвержденные в качестве исходных для страны первичные или специальные эталоны называются государственными.

Государственный эталон — это эталон единицы величины, утвержденный в установленном порядке и применяемый в качестве исходного в Российской Федерации. На каждый государственный эталон утверждается ГОСТ и назначается ученый-хранитель эталона. Большинство государственных эталонов единиц физических величин хранятся во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева в Санкт-Петербурге. Международные эталоны единиц физических величин хранятся в Международном бюро мер и весов (Франция, г. Севр).

В области измерений электрических и магнитных величин на сегодня создано более 30 государственных эталонов. Основу их составляют эталоны, которые воспроизводят единицы наиболее точно и определяют размер остальных производных единиц. В качестве таких эталонов в настоящее время действуют государственные первичные эталоны единиц напряжения (с погрешностью воспроизведения $5 \cdot 10^{-8}$), электрической емкости ($2 \cdot 10^{-7}$), сопротивления ($1 \cdot 10^{-7}$).

Вторичный эталон — это эталон, получающий размер единицы величины непосредственно от государственного эталона данной единицы величины.

Эталон-свидетель — вторичный эталон, предназначенный для проверки сохранности Государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. Эталон-свидетель применяют лишь тогда, когда Государственный эталон является невозпроизводимым.

Эталон-копия — вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц рабочим эталонам. Заметим, что эталон-копия не всегда является физической копией Государственного эталона.

Эталон сравнения — вторичный эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемыми друг с другом (невозможность перевозки). Например, для сличения Государственного эталона вольта с международным эталоном вольта используют «нормальный элемент».

Рабочий эталон — эталон, применяемый для передачи размера единицы физической величины рабочим средствам измерений.

По результатам метрологической аттестации рабочие эталоны могут подразделяться на разряды: первый, второй, третий, четвертый.

Проектом Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» введено понятие исходного эталона. *Исходный эталон* — эта-

лон юридического лица или индивидуального предпринимателя, который обладает наивысшими метрологическими свойствами для данного юридического лица или индивидуального предпринимателя и от которого передается размер единицы величины другим эталонам и средствам измерений.

Организация работ по передаче размеров единиц физических величин рабочим средствам измерений (поверка средств измерений) рассматривается в разд. 4.2.2.

1.3. Средства измерений

Под *средством измерений (СИ)* понимается устройство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики.

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

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и(или) хранения физической величины одного или нескольких размеров с необходимой точностью. Мера может быть представлена в виде тела или устройства. Например, мерой массы является гиря, а мерой сопротивления — образцовый измерительный резистор. Меры могут быть однозначными, т.е. воспроизводящими определенный номинал по данной физической величине (например, конденсатор постоянной емкости), или многозначными, т.е. воспроизводящими ряд одноименных величин различного размера (например, конденсатор переменной емкости). Широкое распространение получили специально подобранные наборы мер, применяемые не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных физических величин различного размера (например, набор измерительных конденсаторов или резисторов). Если набор мер конструктивно объединен в единое устройство, имеющее приспособления для их соединения в различных комбинациях, его называют магазином мер (например, магазин сопротивлений, магазин затуханий).

Измерительный прибор (ИП) — средство измерений, предназначенное для извлечения измерительной информации и преобразования ее в форму, доступную для непосредственного восприятия наблюдателем (оператором). Сигнал измерительной информации в измерительных приборах вырабатывается под воздействием измеряемой величины и функционально связан с числовым значением измеряемой величины. Измерительные приборы, как правило, имеют в своем составе меру (меры).

Измерительные приборы можно классифицировать по ряду признаков.

По принципу действия различают ИП аналоговые и цифровые. Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией значений измеряемой величины, называют аналоговым измерительным прибором, например электроизмерительный прибор с отсчетным устройством в виде стрелки и шкалы — аналоговый прибор. В цифровом приборе автоматически вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, а показания представляются в цифровой форме.

По способу представления измерительной информации измерительные приборы относятся либо к показывающим, либо к регистрирующим. Показывающие приборы допускают только отсчитывание показаний, а регистрирующие предусматривают регистрацию показаний. Регистрация может проводиться с помощью самописцев, устройств автоматической цифровой печати, памяти ЭВМ и др. Часто функции показания и регистрации совмещают в одном приборе. Иногда находят применение так называемые регулирующие ИП, т.е. приборы, имеющие приспособления для управления технологическим процессом.

В зависимости от способа преобразования сигнала измерительной информации различают приборы прямого преобразования (прямого действия) и приборы уравнивающего преобразования (сравнения). В приборах прямого преобразования сигнал измерительной информации преобразуется необходимое количество раз в одном направлении без применения обратной связи. В приборах уравнивающего преобразования наряду с цепью прямого преобразования имеется цепь обратного преобразования сигнала, и измеряемая величина сравнивается с известной величиной, однородной с измеряемой.

В зависимости от степени усреднения измеряемой величины выделяют приборы, дающие показания мгновенных значений измеряемой величины, и приборы интегрирующие, показания которых определяются интегралом по времени от измеряемой величины.

По способу снятия показаний различают приборы прямопоказывающие и непрямопоказывающие. Большинство современных измерительных приборов являются прямопоказывающими. В качестве примера непрямопоказывающего прибора можно привести гетеродинный частотомер, где сначала снимают отсчет с лимбов настройки, а затем по градуировочной таблице определяют показание.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Измерительные преобразователи имеют нормированные метрологические характеристики и конструктивно выполнены, как правило, в виде самостоятельного СИ или являются встроенной составной частью измерительного прибора. С целью сопряжения со СИ и использования в измерительных системах к измерительным преобразователям обычно предъявляют жесткие требования по унификации и стандартизации.

В зависимости от места в измерительной цепи различают преобразователи первичные и промежуточные. Первичные преобразователи — это те, к которым подводится измеряемая величина. Если первичные преобразователи размещаются непосредственно на объекте исследования, удаленном от места обработки, то они называются иногда датчиками.

В зависимости от вида входного сигнала преобразователи подразделяют на аналоговые, аналого-цифровые и цифроаналоговые. В аналоговых измерительных преобразователях на входе и на выходе — аналоговые сигналы. В аналого-цифровых измерительных преобразователях на входе — аналоговый сигнал, а на выходе — цифровой. В цифроаналоговых, наоборот, на входе — цифровой, а на выходе — аналоговый сигнал.

Широко распространены масштабные измерительные преобразователи, предназначенные для изменения размера величины в заданное число раз.

Измерительная установка — это совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств (сопряжения, питания и др.), предназначенных для измерения одной или нескольких физических величин и расположенных в одном месте. Электрорадиоизмерительные установки используют, например, для исследования электрических характеристик и параметров сложных электрорадиотехнических устройств.

Измерительная система — совокупность функционально объединенных мер, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта, с целью измерения одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

В настоящее время измерительные системы создают, как правило, автоматизированными и называют автоматизированными измерительными системами (АИС), информационно-измерительными системами (ИИС), измерительно-вычислительными комплексами (ИВК).

Если в АИС ряд параметров измеряется по принципу «годен — не годен», то такие системы называют автоматизированными системами контроля (АСК).

1.4. Виды и методы измерений

В метрологии измерение определяется как совокупность операций, выполняемых с помощью технического средства, хранящего единицу физической величины, позволяющего сопоставить измеряемую величину с ее единицей и получить значение этой величины.

Процессу нахождения значения физической величины опытным путем с использованием специальных технических средств соответствует

уравнение метрологии, связывающее значение измеряемой величины A с значением этой величины, принятым за единицу измерения $[A]$:

$$A = n [A], \quad (1.1)$$

где n — числовое значение физической величины.

Измерения как экспериментальные процедуры определения значений измеряемых величин весьма разнообразны.

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

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

Наиболее близкими к области телекоммуникационных систем являются следующие виды измерений: энергетических и силовых величин сигналов; параметров элементов радиотехнических устройств, параметров электромагнитных полей, параметров модулированных сигналов и др.

Классификация видов измерений по основным классификационным признакам представлена в табл. 1.1. Дадим краткую характеристику некоторым видам измерений.

Прямое измерение — измерение, при котором исходное значение величины находят непосредственно из опытных данных в результате выполнения измерения. Например, измерение амперметром силы тока.

Косвенное измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, которые подвергаются прямым измерениям. Например, измерение сопротивления резистора с помощью амперметра и

Таблица 1.1

Виды измерений

Классификационный признак	Вид измерения
По виду измеряемой величины	Измерения электрического сопротивления, электрического напряжения, мощности электрического сигнала, напряженности магнитного поля и др.
По способу нахождения числового значения измеряемой величины	Прямые, косвенные, совместные, совокупные
По способу выражения результатов измерения	Абсолютные, относительные
По характеру зависимости измеряемой величины от времени	Статические, динамические
По точности измерения	Максимально возможной точности, технические

вольтметра с использованием зависимости, связывающей сопротивление с напряжением и током.

Различают также совместные и совокупные измерения, при которых по результатам прямых или косвенных измерений одних физических величин находят значения других величин.

Совместные измерения — это проводимые одновременно измерения двух или более неоднородных величин для нахождения зависимости между ними. Классическим примером совместных измерений является нахождение зависимости сопротивления резистора от температуры:

$$R(t^\circ) = R_{20}[1 + A(t^\circ - 20) + B(t^\circ - 20)^2],$$

где R_{20} — сопротивление резистора при $t = 20^\circ\text{C}$; A ; B — температурные коэффициенты.

Для получения зависимости $R(t^\circ)$ необходимо провести минимум три измерения сопротивления R при трех различных температурах $R(t_1^\circ)$, $R(t_2^\circ)$, $R(t_3^\circ)$, составить систему из трех уравнений и решив ее, определить коэффициенты R_{20} , A , B искомой зависимости.

Совокупные измерения — это проводимые одновременно измерения нескольких однородных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях и различных сочетаниях этих величин.

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

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

Абсолютные измерения — измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких величин и использовании значений физических констант, например измерения силы тока в амперах.

Относительные измерения — измерения отношения значения физической величины к однородной величине или изменения значения величины по отношению к однородной величине, принятой за исходную.

К *статическим измерениям* относят измерение, при котором СИ работает в статическом режиме, т.е. когда его выходной сигнал (например, отклонение указателя) остается неизменным в течение времени измерения.

К *динамическим измерениям* относят измерения, выполненные СИ в динамическом режиме, т.е. когда его показания зависят от динамических свойств. Динамические свойства СИ проявляются в том, что

уровень переменного воздействия на него в какой-либо момент времени обуславливает выходной сигнал СИ в последующий момент времени.

Измерения максимально возможной точности, достигаемой при существующем уровне развития науки и техники. Такие измерения проводят при создании эталонов и измерениях физических констант. Характерными для таких измерений являются оценка погрешностей и анализ источников их возникновения.

Технические измерения — это измерения, проводимые в заданных условиях по определенной методике, разработанной и исследованной заранее; как правило, к ним относят массовые измерения, проводимые во всех отраслях народного хозяйства, за исключением научных исследований. При технических измерениях погрешность оценивают по метрологическим характеристикам СИ с учетом применяемого метода измерения.

Контрольно-поверочные измерения — это измерения, выполняемые службами метрологического надзора с целью определения метрологических характеристик СИ. К таким измерениям относят измерения при метрологической аттестации СИ, экспертные измерения и др.

Взаимодействие СИ с объектом основано на физических явлениях, совокупность которых составляет принцип измерений. Совокупность приемов использования принципа и средств измерений называется *методом измерения*.

Все без исключения методы измерений основаны на сравнении измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой (однозначной или многозначной). При этом в зависимости от способа применения меры известной величины выделяют метод непосредственной оценки и методы сравнения с мерой (рис. 1.2).

Метод непосредственной оценки характеризуется тем, что значения измеряемой величины отсчитывают непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Шкала прибора заранее градуируется с помощью многозначной меры в единицах измеряемой величины. Так, измерение силы тока с помощью амперметра является примером прямого измерения методом непосредственной оценки.

Методы сравнения с мерой предполагают сравнение измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, при каждой процедуре



Рис. 1.2. Классификация методов измерений

измерения, т.е. отличительной чертой методов сравнения является непосредственное участие в процессе измерения меры известной величины, однородной с измеряемой. Наиболее распространены следующие методы сравнения: дифференциальный, нулевой, замещения, совпадения.

При *нулевом методе* измерения разность измеряемой величины и известной величины сводится в процессе измерения к нулю, что фиксируется высокочувствительным нуль-индикатором. При высокой точности мер, воспроизводящих известную величину, и высокой чувствительности нуль-индикатора может быть достигнута высокая точность измерения.

При *дифференциальном методе* по шкале измерительного прибора отсчитывают разность измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой. Неизвестную величину определяют по известной величине и измеренной разности. Таким образом, в отличие от нулевого метода при данном методе измеряемая величина уравнивается не полностью.

Метод замещения предусматривает поочередное подключение на вход индикатора измеряемой и известной величин, т.е. измерения проводят в два приема. Наименьшая погрешность измерения получается в том случае, когда в результате подбора известной величины индикатор дает такой же отсчет, что и при неизвестной величине. Примером использования этого метода является измерение рабочего затухания с использованием магазина затуханий.

Метод совпадения основан на измерении разности между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой. При измерении используют совпадения отметок шкал или периодических сигналов. Метод применяют, например, при измерении частоты и времени по эталонным сигналам.

Кроме рассмотренных видов и методов измерений, в зависимости от объекта исследования, свойств СИ и других факторов, измерения выполняют с однократным либо с многократными наблюдениями. Под наблюдением здесь понимается экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерения, в результате которой получают одно значение величины, имеющее всегда случайный характер. При измерениях с многократными наблюдениями для получения результата измерения требуется статистическая обработка результатов наблюдений.

1.5. Понятия о шкалах

Физические и нефизические величины, позволяющие описывать различные свойства объектов, явлений и процессов могут измеряться или оцениваться.

Как уже отмечалось, процесс измерения предполагает сравнение физической величины с ее единицей с помощью специальных технических средств. Величины, для которых нельзя ввести единицу измерения, могут оцениваться. Оценивание — это проводимая по определенным правилам процедура приписывания данной величине определенного знака (числа).

Для измерения и оценивания свойств различных объектов, явлений, процессов в метрологии и квалиметрии используют различные шкалы (не следует отождествлять с понятием «шкала отсчетного устройства средства измерений»).

В соответствии с МИ 2365-96 «ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения», шкалой (шкалой измерений) называется отображение множества различных проявлений качественного или количественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений).

Количественные и качественные шкалы в современной теории измерения и оценивания рассматривают в виде картежа из трех элементов $\langle X, \varphi, Y \rangle$, где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n, R_x\}$ — эмпирическая система, включающая множество свойств x_i , на которых в соответствии с целями измерения задано некоторое отношение R_x ; $Y = \{\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n), R_y\}$ — знаковая система, являющаяся отображением эмпирической системы в виде некоторой образной или числовой системы, соответствующей измеряемой эмпирической системе; $\varphi \in \Phi$ — неоднозначное (гомоморфное) отображение X на Y , устанавливающее соответствие между X и Y так, что $\{\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n)\} \in R_y$ только тогда, когда $(x_1, \dots, x_n) \in R_x$ [45].

В основе определения (классификации) типов шкал лежат допустимые преобразования $x_i \rightarrow y_i$.

Шкала наименований (шкала номинального типа, классификационная шкала) — это тип шкалы, значения которой используют для выявления различий между объектами или их идентификации. Символы вида 1, 2, 3, ..., n , используемые в качестве шкальных значений, являются не числами, а цифрами, предназначенными для обозначения объектов, т.е. они выполняют ту же функцию, что и наименования, и с ними нельзя вести арифметических действий.

В шкалах наименований нельзя ввести понятия единицы измерения. В этих шкалах отсутствует нулевой элемент; отсутствуют и понятия «больше» или «меньше» нуля.

Примеры шкал наименований:

- шкала классификации (оценки) цвета объектов по наименованиям (красный, оранжевый, желтый, ...), опирающаяся на атласы цветов, систематизированные по сходству;
- шкала обозначения городских телефонных номеров;
- шкала обозначений элементов принципиальной схемы радиоэлектронных изделий (спецификация) и др.

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

Преобразование $\varphi(x)$ по шкале порядка может быть монотонно возрастающим или убывающим. Процедура расстановки размеров в порядке их возрастания или убывания с целью получения измерительной информации по шкале порядка называется ранжированием.

Шкала порядка используется в случаях, когда нужно упорядочить объекты в соответствии с каким-либо качеством, а также во времени или пространстве, но при этом не требуется его точного измерения, или когда какое-либо качество в принципе измеримо, но в необходимый момент нет практической или теоретической возможности реализовать это измерение.

Для облегчения ранжирования по шкале порядка некоторые точки на ней принято фиксировать в качестве опорных (реперных). Реперные шкалы порядка получили распространение в гуманитарных науках, спорте, искусстве и других областях.

Точкам реперной шкалы могут быть поставлены в соответствие цифры, называемые баллами, например, 12-балльная международная сейсмическая шкала; 10-балльная минералогическая шкала твердости; четырехбалльная шкала оценивания знаний (неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошо, отлично).

Шкала наименований и шкала порядка — это качественные шкалы. Так, в реперной шкале порядка, несмотря на наличие опорных (реперных) точек, интервалы между этими точками остаются неопределенными, поэтому с баллами нельзя проводить математических действий. В шкалах порядка нельзя ввести единицы измерений, так как они нелинейны и вид нелинейности не всегда известен на отдельных участках.

Шкала разностей (интервалов) в отличие от рассмотренных качественных шкал наименований и порядка обеспечивает суммирование интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойств. На такой шкале откладывается разность значений величины, а сами значения остаются неизвестными. Шкала разностей состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало, т.е. нулевую отметку.

Характерным примером шкалы разностей является шкала интервалов времени. Например, интервалы работы и интервалы отдыха. Их можно складывать и вычитать, но бессмысленно складывать и вычитать даты каких-либо событий.

Второй характерный пример шкалы разностей — это шкалы температур. На шкале Цельсия за начало отсчета разностей температур взята температура таяния льда, и с ней сравнивают все другие температуры. Для удобства использования интервал между температурой таяния льда и температурой кипения воды разбит на 100 равных интервалов — градусов Цельсия. Градус Фаренгейта по размеру меньше градуса Цельсия, так как тот же интервал разбит на 180 градусов. Кроме того, начало отсчета по Фаренгейту сдвинуто на 32 градуса в сторону низких температур. Переход от шкалы Цельсия к шкале температур Фаренгейта происходит по линейному закону $\varphi(x) = ax + b$, т.е. $1^\circ\text{F} = 1,81^\circ\text{C} + 32$.

Из приведенного примера следует, что при переходе к эквивалентной шкале с помощью линейных преобразований в шкале интервалов происходит изменение как начала отсчета (b), так и масштаба измерений (a).

В целом шкала интервалов описывается уравнением вида

$$A = A_0 + n[A],$$

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

Шкалу отношений (подобия) принято рассматривать как шкалу разностей с естественным началом отсчета. Так, например, если за начало температурной шкалы взять абсолютный нуль, то по такой шкале можно отсчитывать, во сколько раз температура одного объекта больше (меньше) другого.

Таким образом, шкала отношений описывается уравнением вида (1.1).

Переход от одной шкалы отношений к другой, эквивалентной ей шкале, осуществляется с помощью преобразований подобия, т.е. изменением масштаба измерений.

Шкалы отношений в отличие от шкал интервалов отражают отношение свойств объектов, т.е. они отражают, во сколько раз свойство одного объекта превосходит это же свойство другого объекта.

Шкалы отношений являются достаточно совершенными, однако построение шкалы отношений возможно не всегда. Например, время можно измеряться только по шкале интервалов.

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

Абсолютные шкалы — это шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений и имеющие свой признак — естественное, однозначное определение единицы измерений (естественный критерий установления размера единицы). Абсолютные шкалы используют для измерений относительных величин, таких, как коэффициент усиления, коэффициент отражения, коэффициент амплитудной модуляции и др.

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

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

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение физической величине.
2. Поясните суть понятий «размер», «размерность» и «значение» физической величины.

3. Назовите основные единицы физических величин СИ.
4. Дайте определение эталона единицы физической величины.
5. Какие вторичные эталоны вы знаете?
6. В чем отличие шкалы отношений от шкалы разностей?
7. Какие технические устройства относятся к средствам измерений?
8. Дайте классификацию измерительных приборов.
9. Измерительные преобразователи — это средства измерений?
10. По каким классификационным признакам различают преобразователи?
11. Чем отличается измерительная система от измерительной установки?
12. Назовите основные классификационные признаки видов измерений.
13. Чем отличаются совместные измерения от совокупных и что у них общего?
14. Какие методы измерений вы знаете?

Глава 2

Погрешности измерений и средств измерений

2.1. Общие сведения

Понятия «погрешность», «точность», «неопределенность» являются базовыми понятиями в метрологии.

Наличие погрешностей объективно определяется невозможностью в процессе измерений идеально отображать свойство исследуемого объекта или процесса. Принято различать погрешность или точность результатов измерений и погрешность или точность СИ.

Погрешностью результата измерения (погрешностью измерения) называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины, а погрешность средств измерений — это разность между показаниями СИ и истинным значением измеряемой величины.

Под точностью измерений в общем случае понимается качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, а точность средств измерений — это качество СИ, отражающее близость к нулю его погрешностей.

Качество измерений считается тем выше, чем ближе результат измерения к истинному значению величины. Однако непосредственно из результата измерений точность определить нельзя.

Обычно о точности говорят в качественном смысле, однако в некоторых случаях точность определяется количественно величиной, обратной модулю относительной погрешности:

$$\varepsilon = 1/|\delta|. \quad (2.1)$$

Требуемую точность измерений обычно выбирают исходя из соображений технической и экономической целесообразности. Повышение требований к точности измерений приводит к увеличению затрат на их проведение, а снижение указанных требований может привести к неправильным результатам оценивания состояния исследуемого явления или процесса.

Понятие «неопределенность измерений» стало активно обсуждаться в научно-технической литературе начиная с 1993 г., когда от имени семи международных организаций по метрологии и стандартизации был

опубликован документ рекомендательного характера «Руководство по выражению неопределенности в измерении» (далее Руководство).

В настоящее время Руководство признано во многих развитых странах мира. В России в 1999 г. появились рекомендации МИ 2552-99, где понятие «неопределенность измерений» рекомендуется использовать в международных метрологических работах, а в 2000 г. ГОСТ 8.000-2000 это понятие ввел официально.

В соответствии с Рекомендациями РМГ 29-99 неопределенность — это параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине.

Считается, что неопределенность измерений (в основном) состоит из многих составляющих. В зависимости от того, как оценивают численные значения составляющих неопределенности измерений, различают оценки неопределенностей двух типов (категорий): А и В.

Оценка типа А определяется экспериментальным стандартным отклонением на основе статистической обработки серии наблюдений.

Оценка типа В также характеризуется стандартным отклонением и основана на распределении вероятностей, но здесь экспериментаторам дается право привлекать дополнительные данные, например, сведения из паспортных данных СИ, сведения из предварительных измерений, результаты экспертного оценивания и др.

В качестве параметров неопределенности рекомендуется использовать стандартную, суммарную и расширенную неопределенности.

Стандартная неопределенность — это неопределенность результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения. Она используется для оценивания неопределенностей типа А и В.

Комбинированная (суммарная) стандартная неопределенность — это стандартная неопределенность результата измерения, получаемая из значений ряда других величин взвешенных в соответствии с тем, как результат измерения изменяется в зависимости от изменения этих величин.

Расширенная неопределенность — это величина, определяющая ширину интервала вокруг результата измерения, в пределах которого находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

В настоящее время введенное Руководством понятие «неопределенность измерений» обязательно к использованию в процессе международных сличений национальных эталонов и оказании калибровочных услуг зарубежным организациям.

Можно предположить, что эволюционный процесс внедрения понятия неопределенности измерений в теорию и практику метрологии будет продолжаться. Возможные пути согласования положений Руководства и действующей в России системы обеспечения единства измерений на основе понятия «погрешность измерений» в настоящее время окончательно еще не определены.

2.2. Погрешности измерений

Для оценивания и определения путей уменьшения погрешностей необходимо знать причины их происхождения и закономерности изменения.

Погрешность измерения (погрешность результата измерения) может быть представлена как результат совместного воздействия различного рода факторов объективного и субъективного характера, что следует учитывать при проведении классификации погрешностей.

Классификация погрешностей измерений и погрешностей СИ по пяти признакам представлена в табл. 2.1. Дадим определение и краткую характеристику погрешностей измерений. (Погрешности СИ рассматриваются в разд. 2.3.)

Абсолютная погрешность измерения — это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины:

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x_{\text{и}}, \quad (2.2)$$

где $x_{\text{изм}}$ — значение величины, полученное в результате ее измерения; $x_{\text{и}}$ — истинное значение величины. Истинное значение измеряемой величины — такое ее значение, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта.

Поскольку истинное значение величины неизвестно, то на практике используют понятие действительного значения величины ($x_{\text{д}}$) (условного истинного значения). Это значение величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближенное к истинному значению,

Таблица 2.1

Погрешности измерений и погрешности средств измерений

Вид погрешности	Погрешности измерений	Погрешности СИ
<i>По способу выражения</i>		
Абсолютная	+	+
Относительная	+	+
Приведенная	-	+
<i>По характеру проявления</i>		
Случайная	+	+
Систематическая	+	+
Грубая	+	-
<i>По источнику возникновения</i>		
Методическая	+	-
Инструментальная	+	-
Субъективная	+	-
<i>По условиям измерений</i>		
Основная	-	+
Дополнительная	-	+
<i>По соотношению быстродействия СИ и скорости изменения физической величины</i>		
Статическая	-	+
Динамическая	-	+

что для данной цели может быть использовано вместо него. С учетом указанного обстоятельства

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}}. \quad (2.3)$$

Относительная погрешность измерения — это отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{\text{д}}} \cdot 100 \%. \quad (2.4)$$

Систематической называется составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях.

Постоянная систематическая погрешность — это погрешность, длительное время сохраняющая свое значение, например, в течение времени выполнения измерений. Изменяющиеся погрешности могут быть непрерывно возрастающими, непрерывно убывающими, изменяющимися периодически или по иной, более сложной закономерности.

Знание характера изменения систематической погрешности дает возможность принять меры по снижению влияния этой погрешности на результат измерения путем ее частичного исключения или компенсации. Это может быть достигнуто посредством устранения источников погрешностей, введением поправок, использованием поправочных формул или кривых, выражающих зависимость показаний приборов от внешних условий (например, температуры) и т.д.

Ту часть погрешности, которая остается после принятия мер по устранению, принято называть неисключенной систематической погрешностью (неисключенным остатком систематической погрешности).

Значение систематической погрешности обычно связывается с понятием *правильности измерения*. Чем меньше систематическая погрешность, тем правильнее проведено измерение, а если систематическая погрешность отсутствует, то результат измерения называется *исправленным*.

Случайной называется составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины, проведенных в одних и тех же условиях.

Случайные погрешности возникают вследствие одновременного влияния на результат измерения трудно поддающихся анализу причин: воздействие внешних электромагнитных полей, случайные изменения самой измеряемой величины, случайные погрешности используемых СИ и др. В каждый момент времени указанные влияющие причины проявляют себя по-разному, поэтому вызываемая ими погрешность относится к разряду случайных.

Случайные погрешности неизбежны, и главной их особенностью является непредсказуемость при проведении очередного отсчета. Следовательно, в основу процедуры оценивания случайных погрешностей

должен быть положен вероятностный подход с использованием теории вероятностей и математической статистики, где случайная погрешность ($\overset{\circ}{\Delta}$) рассматривается как случайная величина, принимающая различные значения ($\overset{\circ}{\Delta}_i$).

Для удобства последующих рассуждений и записей в данном разделе будем полагать, что систематическая составляющая погрешности измерения исключена ($\Delta_c = 0$) и погрешность результата измерения носит случайный характер, т.е. $\overset{\circ}{\Delta} = \Delta$.

Как и для любой случайной величины, основной характеристикой случайной погрешности является интегральный и дифференциальный законы (функции) распределения вероятностей, которые устанавливают связь между возможным значением случайной величины и вероятностью их появления при многократных наблюдениях.

Интегральная функция (закон) распределения определяет вероятность того, что случайная погрешность Δ_i в i -м отсчете принимает значение меньше текущего значения Δ :

$$F(\Delta) = P(\Delta_i < \Delta), \quad (2.5)$$

Функция $F(\Delta)$ обладает следующими известными свойствами:

$$F(\Delta) \geq 0;$$

$$F(\Delta_2) \geq F(\Delta_1) \quad \text{при } \Delta_2 > \Delta_1;$$

$$F(-\infty) = 0, \quad F(+\infty) = 1.$$

Вероятность того, что случайная величина Δ примет значение, лежащее в интервале (Δ_1, Δ_2) , равна разности значений функции распределения на концах этого интервала, т.е.

$$P(\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_2) = F(\Delta_2) - F(\Delta_1). \quad (2.6)$$

Случайная погрешность Δ по своей природе является величиной непрерывной и дифференцируемой, поэтому для ее описания в метрологии широко используют более наглядную дифференциальную форму закона распределения — плотность распределения

$$f(\Delta) = \frac{dF(\Delta)}{d\Delta}. \quad (2.7)$$

Графики дифференциальных функций распределения (кривые распределения) случайных погрешностей (рис. 2.1) обладают максимумом при $\Delta = 0$. Функция $f(\Delta)$ неотрицательна и подчиняется условию нормирования

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta) d\Delta = 1. \quad (2.8)$$

Это означает, что площадь, заключенная между кривой дифференциальной функции распределения и осью абсцисс, равна единице. Ве-

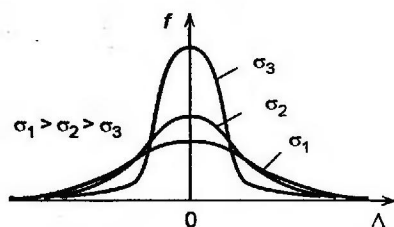


Рис. 2.1. Нормальный закон распределения

роятность попадания случайной погрешности Δ в интервал (Δ_1, Δ_2) определяется по формуле

$$P(\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_2) = \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f(\Delta) d\Delta. \quad (2.9)$$

В метрологической практике используют различные законы распределения случайной погрешности, однако наиболее часто применяют нормальное и равномерное распределение вероятностей.

Нормальный закон распределения вероятностей для описания случайных погрешностей применяют обычно в случаях, когда справедливы три аксиомы.

1. Погрешности могут принимать непрерывный ряд значений.
2. Вероятности появления погрешностей, равных по величине, но противоположных по знаку, одинаковы.
3. Вероятности появления малых погрешностей больше вероятностей появления больших погрешностей.

Функция плотности распределения погрешностей (плотности вероятности) для нормального закона описывается известным выражением

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.10)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение погрешности, характеризующее точность измерения.

Вероятность попадания случайной погрешности в симметричный интервал с границами от $-\Delta_1$ до $+\Delta_1$ в соответствии с равенством (2.9) для нормального закона находится по формуле

$$P(-\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_1) = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\Delta_1} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right) d\Delta. \quad (2.11)$$

Интеграл в формуле (2.11) удобно вычислять, если заменить переменную Δ на $t = \Delta/\sigma$. Правая часть равенства (2.11) преобразуется в этом случае в известную функцию Лапласа, называемую интегралом вероятности. При этом его верхний предел заменяется на $z = \Delta_1/\sigma$:

$$P(-z \leq t \leq z) = \Psi(z) = 2\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt. \quad (2.12)$$

Эта функция табулирована, ее значения приведены в справочниках (см. приложение 4). Пользуясь таблицами, по заданной $\psi(z)$ находят z , а затем рассчитывают $\Delta_1 = z\sigma$.

Вероятность $P_d = \psi(z)$ называется доверительной вероятностью,

а назначенный интервал возможных значений погрешностей — доверительным интервалом $(-\Delta_1, +\Delta_1)$.

При заданном доверительном интервале $(-\Delta_1, +\Delta_1)$, выраженном в долях σ , используя (2.12), можно найти доверительную вероятность P_d . Вероятность того, что данное измерение будет иметь погрешность, выходящую за пределы $\pm\Delta_1$, будет равна $1 - P_d$, а число наблюдений n , при котором в среднем одно измерение будет иметь погрешность, выходящую за пределы $\pm\Delta_1$, будет равно $1/(1 - P_d)$.

Значения доверительного интервала, заданного в единицах σ , доверительной вероятности и числа измерений, при которых в среднем одно измерение имеет погрешность, выходящую за пределы доверительного интервала, приведены в табл. 2.2.

Из таблицы видно, что появление погрешности, большей или меньшей $\pm 2\sigma/3$, равновероятно ($P_d = 1/2$), т.е. на каждые два измерения ($n = 2$) одно измерение в среднем выходит за пределы доверительного интервала. Такая погрешность получила название срединной, или равновероятной.

Для интервала $\Delta = \pm 3\sigma$ можно утверждать, что в 369 из 370 наблюдений с вероятностью 0,997 погрешность заключена в интервале $\pm 3\sigma$ и лишь в одном измерении может выйти за его пределы:

$$P_d(|\Delta| < 3\sigma) = 0,997.$$

Эту погрешность называют предельной (максимально возможной).

Таким образом, можно утверждать, что все возможные случайные погрешности измерения, распределенные по нормальному закону, практически не превышают по абсолютному значению 3σ . Погрешности, выходящие за эти пределы, считают грубыми.

При технических измерениях доверительную вероятность принято считать равной 0,95.

При равномерном распределении погрешность измерений с одинаковой вероятностью может принимать любые значения, не выходящие за некоторые границы. При этом плотность вероятности погрешности $f(\Delta)$ постоянна внутри этих границ и равна нулю вне этих границ (рис. 2.2). Аналитически равномерный закон распределения погрешности может быть записан следующим выражением:

$$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta} & \text{при } -\Delta_1 \leq \Delta \leq +\Delta_1, \\ 0 & \text{при } \Delta < -\Delta_1 \text{ и } \Delta > +\Delta_1. \end{cases} \quad (2.13)$$

Таблица 2.2

Примеры соотношений между доверительным интервалом, доверительной вероятностью и числом измерений

$\pm\Delta_1$	$-2\sigma/3 \dots 2\sigma/3$	$-\sigma \dots +\sigma$	$-2\sigma \dots +2\sigma$	$-3\sigma \dots +3\sigma$
P_d	0,5	0,683	0,955	0,997
n	2	3	22	370

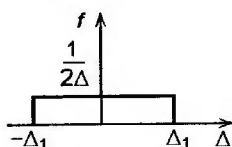


Рис. 2.2. Равномерный закон распределения

Для равномерного распределения, описываемого формулой (2.13), дисперсия D и среднеквадратическое отклонение σ определяются следующим образом:

$$D = \sigma^2 = \int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \Delta^2 f(\Delta) d\Delta = \frac{1}{\Delta_1} \int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \Delta^2 d\Delta = \frac{\Delta_1^2}{12}, \quad (2.14)$$

$$\sigma = \frac{\Delta_1}{2\sqrt{3}}. \quad (2.15)$$

Законы распределения погрешности Δ дают исчерпывающую информацию об этой величине, однако на практике при определении погрешности во многих случаях достаточно знать только числовые характеристики законов распределения. К таким характеристикам при описании свойств случайных погрешностей относятся начальные и центральные моменты.

Для непрерывных случайных величин Δ начальный момент k -го порядка определяется следующей формулой:

$$m_k = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^k f(\Delta) d\Delta. \quad (2.16)$$

Центральный момент k -го порядка рассчитывается по формуле

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} (\Delta - m_1)^k f(\Delta) d\Delta, \quad (2.17)$$

где m_1 — математическое ожидание случайной величины, определяемое по формуле (2.16), при $k = 1$.

Второй центральный момент называется дисперсией случайной погрешности

$$D(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} (\Delta - m_1)^2 f(\Delta) d\Delta. \quad (2.18)$$

Она характеризует рассеяние отдельных значений случайной величины относительно математического ожидания (центра рассеяния). Поскольку дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины, то на практике используется более удобная величина — среднее квадратическое отклонение (СКО), которое имеет размерность самой случайной величины:

$$\sigma(\Delta) = \sqrt{D(\Delta)}. \quad (2.19)$$

Для более подробного описания распределения случайных погрешностей могут использоваться моменты более высоких порядков.

Грубой называется погрешность, существенно превышающая ожидаемую погрешность в данных условиях измерения. Она чаще всего

является следствием кратковременного изменения неучтенных внешних воздействий на результат измерения. Например, кратковременное изменения питающего измерительный прибор напряжения, механическое воздействие на измерительную установку и др. Грубые погрешности по своей природе случайны. Они обычно выявляются при обработке результатов повторных измерений значения измеряемой величины и из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Грубые погрешности, появляющиеся вследствие неправильных действий оператора, называют также промахами. Причинами промахов могут быть, например, ошибки в результате неправильной записи результата измерения, ошибки вследствие неправильного отсчета по шкале прибора и др.

Методической погрешностью (погрешность метода измерений) называется составляющая погрешности измерения, происходящая от несовершенства метода измерений. Причины возникновения этой погрешности могут быть различными: недостаточность изученности объекта измерения; невозможность точного учета влияния внешних факторов; несовершенство теории физических явлений при исследовании конкретной величины и др. В результате указанных причин зависимость между измеряемой величиной и выходным сигналом СИ отличается от реальной. Это и приводит к методической погрешности.

Методические погрешности нельзя найти путем анализа характеристик используемого для измерений измерительного прибора. Они определяются лишь путем создания математических или имитационных моделей объекта измерения.

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

Инструментальной называется составляющая погрешности измерения, зависящая от погрешностей применяемых СИ. Иначе говоря, инструментальная погрешность измерения проявляется как совокупность погрешностей, обусловленных несовершенством свойств используемых СИ.

Различают три составляющих инструментальной погрешности: схемную, технологическую и эксплуатационную.

Схемная погрешность (погрешность схемы или конструкции) — это инструментальная погрешность, присущая самой структурной или кинематической схеме (конструкции) СИ. Эта погрешность не связана с недостатками изготовления СИ.

Технологическая погрешность — это инструментальная погрешность, возникающая в результате несовершенства технологии изготовления СИ. Например, к технологическим относятся погрешности неточного нанесения отметок шкалы (погрешности градуировки).

Эксплуатационная погрешность — это инструментальная погрешность, возникающая в процессе эксплуатации СИ (износ, старение, неисправности).

Субъективной называется погрешность измерения, которая является следствием индивидуальных свойств человека, обусловленных физиологическими особенностями его организма, скоростью реакции или укоренившимися неправильными навыками.

К субъективной погрешности следует отнести прежде всего *погрешность отсчитывания*, происходящую от недостаточно точного отсчитывания показаний СИ. Одной из составляющих погрешности отсчитывания является *погрешность интерполяции*, возникающая от недостаточно точного оценивания на глаз доли деления шкалы, соответствующей положению указателя. Другой составляющей погрешности отсчитывания является *погрешность параллакса*, происходящая вследствие визирования стрелки, расположенной на некотором расстоянии от поверхности шкалы, в направлении, не перпендикулярном поверхности шкалы.

Заметим, что погрешность отсчитывания устраняется при использовании цифровых отсчетных устройств, где погрешность округляется и является инструментальной погрешностью.

2.3. Погрешности и метрологические характеристики средств измерений

Все СИ, независимо от их использования, обладают рядом свойств, которые описываются различными характеристиками.

Среди большого количества характеристик СИ особое место занимают *метрологические характеристики*, т.е. характеристики, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений. Комплекс метрологических характеристик, устанавливаемых в нормативной документации на СИ конкретного типа, называется *нормируемыми метрологическими характеристиками*. Этим характеристикам предписывается определенное числовое значение. Выбор и нормирование метрологических характеристик СИ проводится в соответствии с ГОСТ 8.009.84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

Указанный ГОСТ устанавливает номенклатуру метрологических характеристик СИ, состоящую из шести групп (табл. 2.3).

Вместе с тем вследствие имеющегося разнообразия СИ анализируемые ГОСТ метрологические характеристики представлены в достаточно общем виде. Поэтому, рассматривая основные метрологические характеристики СИ, предпочтение будем отдавать характеристикам измерительных приборов.

Таблица 2.3

Номенклатура метрологических характеристик средств измерений

Группы характеристик	Характеристики
Характеристики для определения результатов измерений	Функция преобразования Значения меры Цена деления Кодовые характеристики
Характеристики погрешностей СИ	Систематическая составляющая Случайная составляющая Вариация выходного сигнала СИ
Характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам	Функция влияния Изменение метрологических характеристик при изменении влияющих величин
Динамические характеристики СИ	Полные Частные
Характеристики взаимодействия СИ	Входной импеданс Выходной импеданс
Неинформативные параметры выходного сигнала	Например, U_m для частотомера

2.3.1. Характеристики, определяющие результаты измерений

Функция преобразования (статическая характеристика преобразования) — функциональная зависимость информационного параметра выходного сигнала СИ от информативного параметра его входного сигнала:

$$Y = F(x). \quad (2.20)$$

Функция преобразования позволяет определить значения измеряемой величины x в рабочих условиях по показанию СИ Y , если измерительный прибор имеет неименованную шкалу или шкалу, отградуированную в единицах входной величины.

Функцию преобразования, установленную в нормативной документации на данное средство измерений (тип), называют *номинальной функцией преобразования*. Номинальную функцию преобразования представляют в виде уравнения, таблицы, графика. Для аналоговых измерительных приборов задание функции преобразования (градуировочной характеристики) означает градуировку шкалы прибора, т.е. нанесение отметок на шкалу прибора. Для цифровых измерительных приборов градуировочная характеристика представляется в виде натуральной последовательности чисел, высвечиваемых на табло. Графическое представление номинальной функции преобразования (F_n) и реальной (F_p) с учетом воздействия аддитивной ($\Delta_{ад}$) и линейной мультипликативной (Δ_m) погрешностей (рис. 2.3, а, б) показано на рис. 2.3, в-д.

При наличии аддитивной погрешности ($\Delta_{ад}$) прямая F_p параллельна прямой F_n , а при наличии мультипликативной погрешности (Δ_m) наклон реальной функции преобразования отличается от наклона графика номинальной функции.

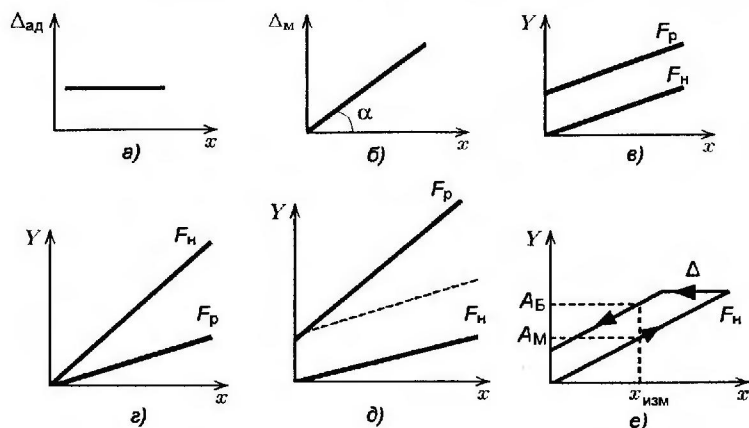


Рис. 2.3. Номинальная и реальная функции преобразования

При наличии аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности график результирующей реальной функции преобразования показан на рис. 2.3,д. Отклонение F_p от F_n может носить и более сложный характер.

Значения однозначной или многозначной меры используются в качестве характеристик для устройств, применяемых в качестве мер.

Значение Y однозначной или значение Y_i многозначной меры определяются соответствующими значениями воспроизводимых данной мерой физических величин. Например, у кварцевого генератора нормируется номинальное значение частоты колебаний на его выходе.

Цена деления шкалы — модуль разности значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. При неравномерной шкале за цену деления берется минимальная цена деления.

Для СИ, выдающих результаты измерений в цифровом коде, указывают характеристики цифрового кода: цену единицы младшего разряда (единицы младшего разряда цифрового отсчетного устройства), вид выходного кода (двоичный или двоично-десятичный) и число разрядов кода.

Цена единицы младшего разряда кода определяется значением измеряемой величины, приходящимся на единицу дискретности, т.е. фактически является аналогом разрешающей способности СИ, имеющих стрелочные отсчетные устройства.

Кроме характеристик, указанных в первой группе табл. 2.3, отметим еще несколько характеристик, важных, на наш взгляд, для определения результатов измерений.

Чувствительность измерительного прибора — это отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Абсолютная чувствительность опре-

деляется формулой

$$S = \Delta_y / \Delta_x, \quad (2.21)$$

относительная чувствительность

$$S = \Delta_y / (\Delta_x / x), \quad (2.22)$$

где Δ_y — изменение сигнала на выходе; Δ_x — изменение измеряемой величины; x — измеряемая величина.

При нелинейной статической характеристике преобразования чувствительность зависит от x , а при линейной характеристике чувствительность постоянна.

Чувствительность измеряется в различных единицах, например, чувствительность канала отклонения луча осциллографа может измеряться в миллиметрах на вольт.

Иногда для характеристики измерительных приборов используется понятие *порога чувствительности*, под которым понимается наименьшее изменение измеряемой величины, вызывающее изменение показания прибора, различаемое без дополнительных устройств. Порог чувствительности цифровых приборов совпадает с единицей младшего разряда.

Диапазон показаний — это область значений измеряемой величины, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы.

Диапазон измерений определяет область значений измеряемой величины, для которой нормированы допустимые погрешности СИ. Диапазон измерений ограничивается наибольшим ($x_{\max}$) и наименьшим ($x_{\min}$) значениями диапазона, т.е. диапазон измерений имеет предел измерений. Часто в измерительных приборах с целью повышения точности измерений общий диапазон измерений делят на несколько частных, такие приборы называют многопредельными.

Если нижним пределом измерений является нуль, то их обычно характеризуют только верхним пределом диапазона измерений.

Отсчет — число, определенное по отсчетному устройству прибора.

Показание прибора — значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины. В некоторых случаях показание определяется с помощью отсчета по прилагаемой к прибору градуировочной характеристике — зависимости между отсчетом и значением величины на входе прибора, представленной в виде таблицы, графика или формулы.

Длина деления шкалы — расстояние между осями двух соседних отметок.

Заметим, что шкалы бывают равномерные, практически равномерные, степенные и существенно неравномерные. Равномерная шкала — шкала с постоянной длиной деления. Практически равномерная шкала — шкала, длины делений которой различаются не более чем на 30 %, а цена делений постоянна. Степенная шкала — шкала с расширяющимися или сужающимися по степенному закону делениями. Существенно неравномерная шкала — шкала с сужающимися делениями,

для которой значение выходного сигнала, соответствующее полусумме верхнего и нижнего пределов диапазона, находится в интервале между 65 и 100 % длины шкалы, соответствующей полному диапазону измеряемой величины.

2.3.2. Характеристики погрешностей средств измерений

Как и погрешности измерений, погрешности СИ можно классифицировать по ряду признаков (см. табл. 2.1). По способу выражения (абсолютная, относительная) и по характеру проявления (случайная, систематическая) погрешности измерений и погрешности СИ имеют одинаковую природу и близкое по формулировке определение.

Абсолютная погрешность средства измерений (измерительного прибора) — это разность между показанием измерительного прибора x_n и действительным x_d значением измеряемой им величины:

$$\Delta = x_n - x_d. \quad (2.23)$$

Абсолютные погрешности, не зависящие от измеряемой величины, называют аддитивными (см. рис. 2.3, а), а зависящие от измеряемой величины — мультипликативными (см. рис. 2.3, б). Абсолютные мультипликативные погрешности могут быть линейными и нелинейными.

Относительная погрешность измерительного прибора — это отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению измеряемой им величины:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_d} \cdot 100 \%. \quad (2.24)$$

Приведенная погрешность средства измерений — отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению (x_n). Под нормирующим значением понимается условно принятое значение, которое в общем случае зависит от характера шкалы и расположения нулевой отметки на шкале (см. разд. 2.2.6). Приведенную погрешность обычно выражают в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100 \%. \quad (2.25)$$

Систематическая погрешность средств измерений — это составляющая погрешности, остающаяся постоянной или закономерно изменяющейся величиной. Она определяется как разность между F_n и F_p .

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

Систематическую погрешность можно считать постоянной или закономерно изменяющейся величиной только для одного экземпляра СИ. Реально в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 8.009-84) систематическая погрешность определяется для совокупности СИ одного типа. Следовательно, систематические погрешности каждого экземпляра будут случайным образом отличаться друг от друга, а систематическая погрешность всей совокупности СИ рассматривается как случайная величина.

С учетом изложенного систематическая погрешность может оцениваться с использованием следующих показателей (характеристик):

- значение Δ_{0S} систематической составляющей основной погрешности СИ;
- математическое ожидание $M[\Delta_{0S}]$ систематической составляющей основной погрешности СИ;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma[\Delta_{0S}]$ систематической составляющей основной погрешности СИ.

При оценивании погрешностей СИ характер изменения систематической составляющей погрешности не всегда можно определить, но при этом оказываются известными границы, в которых она может находиться, следовательно, учитывать такую погрешность можно как случайную, изменяющуюся по неизвестному закону.

В общем случае систематическая составляющая погрешности СИ зависит от времени, т.е. $\Delta_{0S}(t)$, $M[\Delta_{0S}(t)]$, $\sigma[\Delta_{0S}(t)]$, однако в течение небольшой продолжительности обычных измерений ее принято считать постоянной. При учете нестационарности оценивание систематической составляющей погрешности значительно усложняется.

Заметим, что $M[\Delta_{0S}]$ и $\sigma[\Delta_{0S}]$, характеризующие систематическую составляющую по совокупности СИ, могут нормироваться. Нормируется также предел допускаемой систематической составляющей погрешности:

$$\Delta_{0SP} = M[\Delta_{0S}] + K(P)\sigma[\Delta_{0S}], \quad (2.26)$$

где $K(P)$ — коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и законом распределения.

Случайная погрешность средств измерений — это составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом. Причинами случайных погрешностей могут быть: случайные изменения параметров конструктивных элементов СИ; случайное изменение отсчета по шкале прибора и др.

Характеристики случайной составляющей погрешности СИ:

- среднее квадратическое отклонение $\sigma(\overset{\circ}{\Delta})$;
- нормированная автокорреляционная функция $r(\tau)$;
- $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$ — случайная составляющая, вызванная гистерезисом, которая обусловлена отличием (вариацией) показаний конкретного экземпляра СИ от значения параметра измеряемого сигнала при различных скоростях и направлениях его изменения.

Для $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$ нормируется предел допускаемой вариации выходного сигнала H_{0P} . В пределах от нуля до H_{0P} случайная погрешность от гистерезиса $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$ обычно принимается распределенной по равномерному закону.

Для $\sigma(\overset{\circ}{\Delta})$ нормируется предел допускаемого среднего квадратического отклонения (СКО), а для $r(\tau)$ — номинальная нормализованная автокорреляционная функция и предел допускаемого отклонения этой функции от номинальной.

В зависимости от соотношения между быстродействием СИ и скоростью изменения физической величины различают динамические и статические погрешности.

Статическая погрешность — это погрешность, возникающая при измерении им постоянной во времени физической величины. В статическом режиме измеряемая величина и выходной сигнал, по которому оценивается результат измерения, являются неизменными во времени.

Динамическая погрешность — это погрешность, возникающая при измерении изменяющейся в процессе измерения физической величины. Динамическая погрешность определяется как разность между погрешностью в динамическом режиме и статической погрешностью, соответствующей значению измеряемой величины в данный момент времени. В момент времени t_1 динамическая погрешность $\Delta_1 = \Delta_{\text{дин}1} - \Delta_{\text{ст}1}$ (рис. 2.4). Величина динамической погрешности зависит от соотношения между скоростью изменения измеряемой величины и скоростью реакции СИ на это изменение.

При анализе погрешностей статические и динамические погрешности рассматриваются отдельно. Динамическую погрешность, зависящую от инерционных свойств СИ, принято называть погрешностью линейных искажений.

Вариация показаний (измерительного прибора) — это различие в показаниях в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

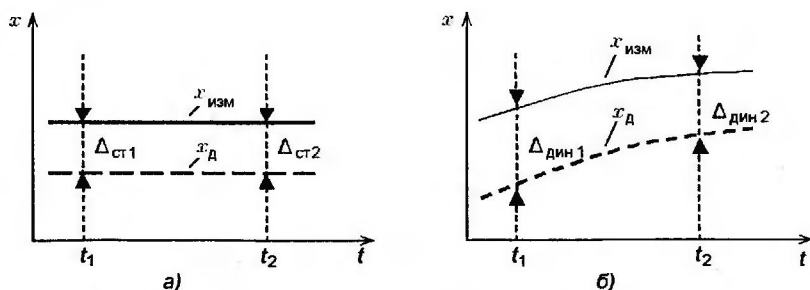


Рис. 2.4. К определению статической и динамической погрешностей

Вариация показаний H_p вычисляется как абсолютная разность показаний в одной и той же точке шкалы при прямом (со стороны меньших величин) и обратном (со стороны больших величин) значений измеряемой величины:

$$H_p = |A_m - A_6|.$$

При многократном повторении измерений берется абсолютная разность средних значений:

$$H_p = |\bar{A}_m - \bar{A}_6|.$$

Вариация нормируется пределом допускаемого значения вариации СИ данного типа.

Для измерительных приборов с аналоговым отсчетным устройством основными причинами вариации показаний являются процессы трения в подшипниках или подвесках. Реальная функция преобразования в этом случае напоминает форму гистерезисной кривой (см. рис. 2.3,е).

2.3.3. Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам

Рассмотренные характеристики систематической и случайной составляющих описывают погрешности СИ в нормальных условиях эксплуатации и образуют основную погрешность Δ_0 .

Нормальными принято считать следующие условия: температура окружающей среды 20 ± 5 °C; атмосферное давление 760 ± 30 мм рт.ст., относительная влажность воздуха 60 ± 15 %.

Порядок суммирования составляющих основной погрешности СИ рассматривается в гл. 3.

Реальные условия эксплуатации СИ могут отличаться от нормальных, в результате чего возникают дополнительные погрешности, значения которых определяются чувствительностью СИ к влияющим величинам (факторам). Характеристиками чувствительности СИ к влияющим величинам являются функция влияния $\Psi(\xi)$; изменения $\varepsilon(\xi)$ значений метрологических характеристик, вызванные изменениями влияющих величин в установленных пределах.

Функция влияния $\Psi(\xi)$ устанавливает зависимость метрологических характеристик СИ от изменения влияющих величин в рабочих условиях применения. Чаще всего устанавливается зависимость инструментальной погрешности от изменения влияющих факторов.

Характеристики чувствительности $\Psi(\xi)$ и $\varepsilon(\xi)$ могут нормироваться как для каждой влияющей величины, так и для совместных изменений нескольких влияющих величин, т.е. $\Psi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ и $\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$.

Поскольку инструментальная погрешность имеет систематическую и случайную составляющие, то введены понятия функции влияния величины ξ на систематическую погрешность $\Psi_{\Delta S}(\xi)$ и функции влияния этой величины на СКО случайной погрешности $\Psi_{\sigma}(\xi)$, что позволя-

ет определять математическое ожидание дополнительной погрешности (т.е. систематическую составляющую)

$$M[\Delta_c] = \psi_{\Delta S}(\xi)$$

и СКО дополнительной погрешности

$$\sigma[\Delta_c] = \psi_{\sigma}(\xi).$$

Такой подход является удобным для определения погрешности с учетом основной и дополнительной погрешностей.

2.3.4. Динамические характеристики средств измерений

В зависимости от характера изменения измеряемой физической величины и свойств СИ последние могут работать в статическом или динамическом режимах.

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

Погрешности СИ, определяемые характером изменения физической величины, также разделяют на статические и динамические (см. табл. 2.1).

По величине динамической погрешности принято определять режим работы СИ. В соответствии с ГОСТ 8.009-84 динамическая погрешность считается существенной и учитывается как дополнительная погрешность, а режим измерения считается динамическим, если выполняется условие

$$\Delta_{д\max} \geq 0,17\Delta_{\max\text{СИ}}, \quad (2.27)$$

где $\Delta_{д\max}$ — максимальное значение динамической погрешности данного типа в рабочих условиях его применения; $\Delta_{\max\text{СИ}}$ — максимально возможное значение погрешности СИ в рабочих условиях его применения.

Различают полные и частные динамические характеристики. Они отражают инерционные свойства СИ при воздействии на него прежде всего меняющихся во времени измеряемых физических величин (параметров входного сигнала), а также внешних влияющих величин и нагрузок.

Полная динамическая характеристика однозначно определяет изменение выходного сигнала аналогового СИ при любом изменении во времени входного сигнала, влияющей величины или нагрузки. К полным динамическим характеристикам относятся передаточная функция, переходная характеристика, импульсная характеристика, совокупность амплитудной и фазочастотной характеристик или каждая из них в отдельности. Для полной динамической характеристики нормируется но-

минальное значение и пределы допускаемых отклонений от нее. Предпочтительной из указанных является та характеристика, которую проще получить экспериментально.

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

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

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

Погрешность датирования отсчета является следствием неоднозначности времени (внутри шага дискретизации входного сигнала), при котором значение изменяющейся величины оказывается равным значению выходного цифрового сигнала в соответствующем цикле преобразования.

Коэффициент демпфирования (степень успокоения) — это параметр дифференциального уравнения второго порядка, описывающего линейное СИ.

Время реакции для измерительных приборов — это время установления показаний аналоговых приборов или быстродействие для цифровых приборов.

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

2.3.5. Характеристики взаимодействия средств измерений с объектами или устройствами на их входе и выходе

Неинформативные параметры выходного сигнала. Характеристики взаимодействия СИ с объектами или устройствами на входе и выходе СИ:

- входное полное сопротивление (входной импеданс);
- выходное полное сопротивление (выходной импеданс).

Входное сопротивление влияет на мощность, потребляемую от объекта исследования. При измерениях в маломощных цепях потребление прибором относительно большой мощности может нарушить режим работы цепи.

От выходного сопротивления СИ зависит допустимая нагрузка. Чем меньше выходное сопротивление, тем больше допустимая нагрузка на СИ.

Нормирование метрологических (импедансных) характеристик данной группы осуществляется в нормативно-технической документации

конкретных типов СИ путем представления входных цепей в виде эквивалентной схемы замещения с указанием значений элементов схемы.

В заключение данного раздела дадим определение неинформативным параметрам выходного сигнала СИ. Неинформативные параметры выходного сигнала СИ — это характеристики, определяющие рабочую область значений тех параметров выходного сигнала, которые не содержат информации о значении измеряемой величины, но определяют возможность нормальной работы СИ. Примером неинформационных параметров могут служить амплитуда и форма сигнала исследуемого частотомером. Действительно, для нормальной работы частотомера нужно, чтобы они удовлетворяли определенным требованиям, хотя эти параметры не несут информации о значении измеряемой частоты.

Кроме рассмотренных в настоящем разделе характеристик, ГОСТ 8.0089-84 предполагает при необходимости вводить и нормировать дополнительные характеристики, позволяющие более полно описывать соответствующие свойства СИ.

2.3.6. Классы точности средств измерений

Рассмотренные в разд. 2.3.1–2.3.5 метрологические характеристики СИ соответствуют ГОСТ 8.009.84 и являются достаточно полными. Вместе с тем в настоящее время в эксплуатации находится большое количество измерительной техники, для которой погрешности нормируют по максимально допустимым значениям основной и дополнительной погрешностей в соответствии с ГОСТ 8.401-80 «Классы точности средств измерений. Общие требования». При этом в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения СИ пределы допускаемых погрешностей выражают в форме приведенных, относительных и абсолютных погрешностей.

Пределом допускаемой погрешности СИ в общем случае называется наибольшая (без учета знака) погрешность, при которой СИ может быть признано годным и допущено к применению. Данное определение справедливо применительно как к основной, так и к дополнительной погрешности.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины или условно в делениях шкалы, устанавливают по формуле

$$\Delta_{\Pi} = \pm a, \quad (2.28)$$

если погрешность имеет аддитивный характер, или по формуле

$$\Delta_{\Pi} = \pm(a + bx), \quad (2.29)$$

если погрешность имеет соизмеримые аддитивную и мультипликативную составляющие, где x — значение измеряемой величины или число делений, отсчитанных по шкале; a , b — положительные числа, не зависящие от x .

С точки зрения точности a — остаточная погрешность, величина которой определяется выбранным методом измерения, а bx — так называемая погрешность чувствительности СИ. Величина этих составляющих определяется стандартами на конкретные СИ; например, погрешность установки выходного напряжения измерительного генератора

$$U = (0,3 + 0,15U), \text{ мкВ},$$

где U — устанавливаемое выходное напряжение в микровольтах.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности могут устанавливать также по более сложной формуле, в виде графика или таблицы.

Пределы допускаемой относительной основной погрешности (в процентах) устанавливают по формуле

$$\delta_{\Pi} = \frac{\Delta_{\Pi}}{x} \cdot 100 = \pm q, \quad (2.30)$$

если преобладает погрешность, имеющая мультипликативный характер, т.е. Δ_{Π} установлена по формуле

$$\Delta_{\Pi} = \pm bx, \quad (2.31)$$

или по формуле

$$\delta_{\Pi} = \Delta_{\Pi}/x = \pm[c + d(|x_k/x| - 1)]. \quad (2.32)$$

если погрешность имеет соизмеримые аддитивную и мультипликативную составляющие, т.е. Δ_{Π} установлена по формуле (2.29).

В выражении (2.32) x_k — больший по модулю из пределов измерений; c, d — положительные числа. Значения c, d выбирают из следующего ряда:

$$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; (1,6 \cdot 10^n); 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; (3 \cdot 10^n); 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n. \quad (2.33)$$

Значения, указанные в скобках, не устанавливают для вновь разрабатываемых СИ.

В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по более сложной формуле, а также в виде графика или таблицы.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности (в процентах) устанавливают по формуле

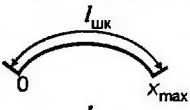
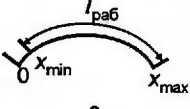
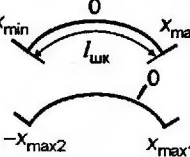
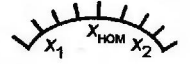
$$\gamma_{\Pi} = (\Delta_{\Pi}/x_n) \cdot 100 = \pm p, \quad (2.34)$$

где Δ_{Π} — пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (2.28); x_n — нормирующее значение — условно принятое значение измеряемой величины, выраженное в тех же единицах, что и Δ_{Π} ; p — отвлеченное положительное число.

Нормирующее значение x_n для аналоговых СИ выбирают в зависимости от характера шкалы и расположения (наличия) нулевых отметок (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Примеры определения нормирующих значений
для аналоговых средств измерений

Располо- жение нулевой отметки	Вид шкалы	Нормирующее значение x_n при характере шкалы	
		равномерном, практически равномерном, степенном	существенно неравномерном
На краю диапазона		$x_{\max}$	$l_{\text{шк}}$
Вне диа- пазона измерений		$x_{\max} - x_{\min}$	$l_{\text{раб}}$
Внутри диапазона измерений		1. $ x_{\max} $ 2. $ x_{\max 2} $	$l_{\text{шк}}$
Условный нуль		$ x_2 - x_1 $	—
Установ- ленное значение		$x_{\text{ном}}$	—

Для СИ с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, если нулевое значение находится на краю или вне диапазона измерений, нормирующее значение x_n устанавливают равным большему из пределов измерений или равным большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений.

Для электроизмерительных приборов с равномерной шкалой, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений x_n допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений. Для СИ, у которых принята шкала с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений. Для СИ с установленным номинальным значением нормирующее значение равно этому номинальному значению. Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой (например для омметров) x_n устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. Длина шкалы (рабочей части шкалы) указывается в миллиметрах. (Для сохранения размерности в формулу определения класса точности при существенно неравномерной шкале вводится нормирующий множитель, указывающий число миллиметров, приходящихся на единицу величины.)

Рассмотренные пределы допускаемых погрешностей непосредствен-

но связаны с установлением другой характеристики СИ — класса точности.

Класс точности средств измерений — это обобщенная характеристика СИ, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами СИ, влияющими на точность. Значения этих свойств устанавливают в стандартах на отдельные виды СИ.

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

Порядок определения погрешности СИ по условному обозначению класса точности рассматриваются в разд. 3.3.3.

Энтропийная оценка погрешностей средств измерений. В настоящее время в процессы получения измерительной информации активно внедряются методы теории информации.

Так как СИ обеспечивают получение измерительной информации, то, используя положения теории информации, можно утверждать, что количество информации, получаемой в результате измерения, равно уменьшению неопределенности значения измеряемой величины.

Мерой неопределенности в теории информации является безусловная энтропия, определяемая как

$$H(x) = - \int_{-y}^y f(x) [\ln f(x)] dx, \quad (2.35)$$

где $f(x)$ — плотность распределения величины x ; y — границы закона распространения. Знак минус ставится, чтобы значение энтропии было величиной положительной, так как значения логарифмов величин, меньших единицы, отрицательны.

При известном законе распределения вероятностей $H(x)$ позволяет оценить неопределенность значений, которые остаются после измерения значения измеряемой величины. Заметим, что энтропия равна нулю, если информация о измеряемой величине после измерения оказывается достоверной.

Используя понятие энтропии, количество информации I , полученное при измерении, можно определить следующим образом:

$$I = H(x) - H(x/x_n), \quad (2.36)$$

где $H(x)$ — априорная безусловная энтропия, зависящая только от закона распределения измеряемой величины, рассматриваемой как случайная; $H(x/x_n)$ — апостериорная условная энтропия при известном

результате измерения x_i , зависящая только от закона распределения погрешностей Δ .

За основу для энтропийного значения погрешности измерения в метрологии принято брать наибольшее значение погрешности при равномерном распределении $H_p(\Delta)$, которое вносит такую же дезинформацию, как и погрешность с любым другим законом распределения $H_x(\Delta)$. Иначе говоря, для равномерного закона подбирается такое значение Δ , при котором энтропия исследуемого закона $H_x(\Delta)$ равна энтропии $H_p(\Delta)$.

На основе (2.35) условную энтропию равномерного распределения можно представить в следующем виде:

$$H_p(\Delta) = - \int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \frac{1}{2\Delta} \left(\ln \frac{1}{2\Delta_1} \right) d\Delta = \ln(2\Delta_1), \quad (2.37)$$

где $(-\Delta_1, \Delta_1)$ — интервал исследования.

Для нормального распределения доказано, что

$$H_n(\Delta) = - \int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-\Delta^2}{2\sigma^2} \ln \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-\Delta^2}{2\sigma^2} \right) d\Delta = \ln(\sigma\sqrt{2\pi e}), \quad (2.38)$$

где e — основание натурального логарифма; σ — среднее квадратическое отклонение.

Из сравнения (2.37) и (2.38) следует, что $2\Delta_1 = \sigma\sqrt{2\pi e}$. Значит, энтропийное значение погрешности для нормального распределения

$$\Delta_9 = 0,5\sigma\sqrt{2\pi e} = 2,076\sigma_n,$$

т.е. энтропийная погрешность при нормальном распределении имеет линейную зависимость от средней квадратической погрешности.

В общем случае для различных законов распределения степень дезинформационного действия погрешности принято оценивать с помощью энтропийного коэффициента, который определяется отношением энтропийного значения погрешности к среднему квадратическому отклонению σ одного и того же закона:

$$K_9 = \Delta_9 / \sigma_x.$$

Для нормального распределения $K_9 = K_n \approx 2,076$; для равномерного распределения $K_9 = K_p \approx 1,73$. Следовательно, погрешность, распределенная по нормальному закону, при одинаковых значениях СКО вносит большее дезинформационное действие, чем погрешность, распределенная равномерно, т.е. приводит к большей потере измерительной информации. В теории погрешностей показано, что данное утверждение справедливо не только для равномерного, а и для любого закона распределения.

Считается, что информационный подход к оцениванию (сравнению)

результатов измерений по энтропийному значению погрешности в области электрорадиоизмерений является перспективным.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите виды погрешностей измерений и виды погрешностей СИ. Сравните их.
2. Чем характеризуется неопределенность измерений?
3. Дайте определение и приведите примеры систематической погрешности.
4. Дайте определение случайной погрешности.
5. Назовите основные свойства интегральной и дифференциальной функции распределения случайной погрешности.
6. Какая погрешность называется случайной?
7. Какие характеристики СИ называют нормируемыми метрологическими?
8. Какими параметрами может оцениваться систематическая составляющая погрешности СИ?
9. Назовите частные составляющие случайной погрешности СИ. Как они называются?
10. Назовите две основные характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам.
11. Приведите примеры общих и частных динамических характеристик СИ.
12. На что оказывают влияние полное входное и выходное сопротивление СИ?
13. Дайте определение пределу допускаемой погрешности СИ.
14. Как определить нормирующее значение аналоговых СИ?
15. Дайте определение классу точности СИ.
16. Что принято брать за меру неопределенности в теории информации?
17. Как определить количество информации при измерении, используя понятие энтропии?
18. Чем определяется знание энтропийного коэффициента погрешности?

Обработка результатов измерений

Процесс измерений принято разделять на три этапа: подготовка к измерениям, проведение измерений, обработка результатов измерений.

На первом этапе при подготовке к измерениям следует внимательно относиться к выбору средства измерений (СИ), обеспечивающих заданную точность измерений. При этом, как правило, возникает потребность решать противоречивую задачу выбора компромисса между точностью результата измерения и экономическими затратами. Необоснованно высокие требования по точности могут сделать измерительную задачу неоправданно сложной и дорогостоящей.

На втором этапе процесса измерений особое внимание следует уделить устранению известных систематических погрешностей.

Заключительным этапом проведения измерений является обработка результатов измерений, включающая в себя совокупность вычислительных процедур для получения оценки результата измерения и интервала, между границами которого с определенной вероятностью находится действительное значение измеряемой физической величины.

Обработка результатов измерений может проводиться различными методами. Выбор метода зависит от многих причин, основными из которых являются следующие: число проведенных отсчетов в процессе измерения; вид измерений; условия измерений; свойства используемых СИ; предварительная информация об источнике и характере погрешностей и др.

Рассмотрим наиболее распространенные задачи, встречающиеся при обработке результатов измерений.

3.1. Обнаружение и устранение систематических погрешностей

Систематические погрешности в зависимости от источника (причины) возникновения разделяются, как уже отмечалось, на методические, инструментальные и субъективные. Кроме того, систематические погрешности могут быть постоянными или переменными, а также аддитивными или мультипликативными. Указанные разновидности систематических погрешностей следует учитывать при их выявлении и устранении.

Обнаружение и устранение систематических погрешностей проводится на протяжении всего процесса измерений: при подготовке к измерениям (профилактика погрешностей); в процессе измерений (экспериментальное исключение погрешностей); при обработке результатов измерений (оценка границ систематических погрешностей или внесение поправок в результат измерения).

Исключение или снижение систематических погрешностей является важной задачей, так как невыявленные систематические погрешности устойчиво искажают результат измерения и поэтому считаются более опасными по сравнению со случайными погрешностями, которые определяют достоверность результата измерения.

Если причины и источники систематических погрешностей обнаружены, то можно принять меры к их устранению или исключению. Устранение обнаруженной систематической погрешности из результата измерения проводят посредством введения поправки или поправочного множителя. *Поправкой* называется значение величины, одноименной с измеряемой, которое следует прибавить к полученному при измерении значению величины. Поправка вносится, когда погрешность носит аддитивный характер. *Поправочный множитель* представляет собой число, на которое умножают результат измерения (при мультипликативной погрешности). После внесения поправки или поправочного множителя результат измерения называется *исправленным*.

На первом этапе процесса измерений, т.е. при подготовке к измерениям, выявление и устранение возможных причин возникновения систематических погрешностей во многом определяется опытом оператора, пониманием им природы возникновения погрешностей, правильностью выбора метода измерения и СИ. Вместе с тем известны общие правила (рекомендации), которыми следует руководствоваться для выявления и устранения рассматриваемых погрешностей. Рассмотрим некоторые правила.

Использование для измерений только поверенных средств измерений. Применение на практике этого требования является наиболее простым и вместе с тем эффективным средством обнаружения и устранения постоянной систематической погрешности. В процессе поверки показаний поверяемого измерительного прибора $x_{\text{пов}}$ сравнивают с показаниями рабочего эталона $x_{\text{эт}}$ и определяют погрешность

$$\Delta = x_{\text{пов}} - x_{\text{эт}}.$$

Поправка ∇ в данном случае будет равна обнаруженной погрешности взятой с противоположным знаком, т.е.

$$\nabla = -\Delta.$$

Заметим, что даже после внесения поправки в результат измерения, полученный с помощью поверенного СИ, неисключенный остаток систематической погрешности остается. Его можно считать равным погрешности рабочего эталона.

Калибровка средств измерений с помощью внешнего или внутреннего источника калибровочного сигнала с параметрами, заданными с высокой точностью. Для некоторых СИ, например осциллографа, эта операция проводится после каждого переключения пределов измерений, тем самым устраняется мультипликативная составляющая систематической погрешности. Аддитивная составляющая погрешности устраняется перед началом измерений, например, путем установки нулевых показаний.

Устранение факторов, определяющих возникновение погрешностей. Наиболее распространенными мероприятиями, направленными на устранение (уменьшение) влияющих факторов, являются термостатирование, экранирование, стабилизация источников питания СИ, амортизация СИ, удаление средства и объектов измерений от источников влияющих воздействий и др.

На втором этапе процесса измерений, т.е. при проведении измерений, систематические погрешности исключают несколькими методами. Наибольшее распространение получили метод замещения, метод компенсации погрешностей по знаку, метод рандомизации и др.

При использовании *метода замещения* измеряют неизвестную величину (x), а затем одноименную известную величину, воспроизводимую регулируемой мерой (x_m). Регулируя величину меры, добиваются одинаковых показаний измерительного прибора, тогда $x = x_m$, т.е. за окончательный результат измерения принимают значение меры x_m . Погрешность измерения при использовании этого метода определяется погрешностью меры и погрешностью, возникающей при отсчете. Так как точность мер обычно выше точности используемых измерительных приборов, данный метод во многих случаях позволяет существенно повысить точность. Устранение систематических погрешностей методом замещения широко используют в современных цифровых приборах. Например, в цифровых вольтметрах постоянного тока подстройка рабочего тока прибора осуществляется с использованием нормального элемента.

Метод компенсации погрешности по знаку применяется при направленном действии величины, вызывающей систематическую погрешность, т.е. когда погрешности в зависимости от условий измерения могут входить в результат измерения с противоположными знаками. Суть метода состоит в проведении двух измерений одной и той же величины (x) таким образом, чтобы систематическая погрешность была с разными знаками: $\alpha_1 = x + \Delta_c$, $\alpha_2 = x - \Delta_c$. Тогда искомое значение измеряемой величины, не содержащее систематической погрешности, определяется равенством

$$x = (\alpha_1 + \alpha_2)/2.$$

Например, для исключения влияния напряженности внешнего постоянного электрического или магнитного поля знак погрешности изменяют поворотом измерительного прибора на 180° .

Эффективным методом исключения систематической инструментальной погрешности считается ее *рандомизация* (перевод в случай-

ные). Рандомизация обычно осуществляется путем многократного измерения одной и той же величины несколькими однотипными приборами. При этом, если для одного прибора погрешность систематическая, то для каждого из ансамбля измерительных приборов она изменяется случайно. При усреднении результата ансамбля измерений систематические погрешности, присущие каждому прибору, в значительной мере компенсируются.

На третьем этапе процесса измерения, т.е. при обработке результатов измерений, следует исходить из того, что при любых измерениях полное исключение систематической погрешности невозможно, т.е. всегда остается часть неисключенной погрешности, которая и является систематической составляющей погрешности измерения.

3.2. Устранение грубых погрешностей

Напомним, грубой называется погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. При принятии решения о наличии грубых погрешностей нужно внимательно анализировать условия, при которых получился результат, отличающийся от ожидаемого. Если при однократных измерениях имеются подозрения на промахи, то их можно устранить путем проведения нескольких повторных измерений. При многократных измерениях вопрос о содержании в результате наблюдений грубых погрешностей решается методами проверки статистических гипотез. Проверяемая гипотеза состоит в утверждении того, что результат наблюдения x_i является одним из значений измеряемой величины, т.е. не является грубой погрешностью. На основании статистических критериев проводится опровержение выдвинутой гипотезы. Если гипотеза опровергается, то результат наблюдений содержит грубую погрешность. Известно несколько таких критериев: Романовского, Райта, Шовенэ, Шарлье, Граббса и др.

При многократных измерениях и числе наблюдений $n < 20$ «подозрительные» результаты наблюдений сравнивают с некоторым статистическим критерием:

$$\beta = \frac{|x_i - \bar{x}|_{\max}}{\hat{\sigma}}, \quad (3.1)$$

где $|x_i - \bar{x}|_{\max}$ — максимально возможное отклонение от среднего; $\hat{\sigma}$ — среднее квадратическое значение ряда наблюдений.

Значение β рассчитывают при различном числе наблюдений n и различных уровнях значимости $\alpha = 1 - P_d$, где P_d — доверительная вероятность (приложение 3).

Последовательность оценки по данному методу следующая:

- упорядочивают результаты наблюдений, т.е. записывают в виде:
 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$;
- подсчитывают среднее значение $\bar{x}$ и среднее квадратическое отклонение $\hat{\sigma}$;

- находят отклонения

$$S_n = \frac{x_n - \bar{x}}{\hat{\sigma}}, \quad S_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{\hat{\sigma}}; \quad (3.2)$$

- результаты сравнивают с предельным отклонением β для данного распределения случайной величины, которое берется из справочных данных для конкретного числа наблюдений n и принятого уровня значимости α . При $S_n \geq \beta$ ($S_1 \geq \beta$) результат считают аномальным и исключают.

Пример. Проведено 10 отсчетов уровня сигнала: 72,36; 72,35; 72,35; 72,34; 72,33; 72,37; 72,36; 72,35; 72,35; 72,36 (дБ). Проверить, содержит ли результат измерения грубую погрешность, если доверительная вероятность $P_d = 0,9$.

Результаты измерения запишем в виде возрастающего ряда: 72,33; 72,34; 72,35; 72,35; 72,35; 72,35; 72,36; 72,36; 72,36; 72,37.

Найдем среднее значение $\bar{x}$ и среднеквадратическое отклонение σ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 72,352; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,011.$$

Определим отклонения:

$$S_{10} = \frac{x_{10} - \bar{x}}{\sigma} = 1,63; \quad S_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{\sigma} = 2,0.$$

Значения S_{10} и S_1 сравним с предельным отклонением, взятым из справочных данных (приложение 3).

При $\alpha = 1 - P_d = 0,1$ и $n = 10$ находим $\beta = 2,03$.

Вывод: $S_{10} < 2,03$ и $S_1 < 2,03$, следовательно, грубых погрешностей нет.

3.3. Обработка результатов прямых однократных измерений

В повседневной практике радиотехнических измерений прямые однократные измерения получили широкое распространение.

Вопросы, связанные с обработкой результатов прямых однократных измерений, рассматриваются в нормативных документах в области метрологии. К таким документам относятся:

- рекомендация по метрологии МИ1552-86 «Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений»;
- ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений»;
- Руководящий документ РД 50-453-84 «Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета»;
- ГОСТ 8.401-80 «ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования».

Порядок оценивания результата прямых однократных измерений рассмотрим с учетом требований указанных нормативных документов.

3.3.1. Оценивание погрешностей результатов прямых однократных измерений

В соответствии с рекомендацией МИ 1552-86 обработка результатов измерений проводится на основе предварительно полученной (априорной) информации о составляющих погрешности и их законах распределения. Считается, что закон распределения случайных составляющих имеет нормальный характер, а неисключенные систематические погрешности распределяются по равномерному закону. Доверительная вероятность принимается, как правило, равной 0,95.

В большинстве практических случаев, когда шкала используемого СИ проградуирована в значениях измеряемой величины, результатом прямого однократного измерения, без учета погрешности, является единственное показание A_1 этого СИ. И лишь в отдельных случаях приходится проводить соответствие между значением отсчета и показанием A_1 . Например, отсчет с лимбов гетеродинного частотомера переводят в значение частоты посредством градуировочных таблиц.

Оценивание погрешностей прямых однократных измерений рассмотрим для некоторых случаев, встречающихся в измерительной практике.

Случай 1. Имеются m неисключенных систематических погрешностей, и каждая из них задана своими границами Δ_{ci} .

В этом случае доверительная граница суммарной неисключенной систематической погрешности результата измерения $\Delta_c(P)$ оценивается по формуле

$$\Delta_c(P) = K \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{ci}^2}, \quad (3.3)$$

где K — поправочный коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и числа m составляющих Δ_{ci} .

При доверительной вероятности $P = 0,9$ коэффициент $K = 0,95$; при $P = 0,95$ $K = 1,1$. При $P = 0,99$ поправочный коэффициент K принимается равным 1,45, если число суммируемых слагаемых $m > 4$. Если $m = 4$, то $K = 1,4$; при $m = 3$ $K \approx 1,3$; при $m = 2$ $K \approx 1,2$. Более точные значения K при $P = 0,99$ можно найти в ГОСТ 8.207-76 из графиков $K = \varphi(m, l)$, где $l = \Delta_{c1}/\Delta_{c2}$; Δ_{c1} — максимальная граница; Δ_{c2} — граница, ближайшая к Δ_{c1} .

Случай 2. Имеются m неисключенных систематических погрешностей. Каждая из известных погрешностей задана доверительными границами с различными доверительными вероятностями (в том числе и рассчитанными по формуле (3.3)). В этом случае

$$\Delta_c(P) = K \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta_{ci}^2(P_i)}{K_i^2}}, \quad (3.4)$$

где $\Delta_{ci}(P_i)$ — доверительная граница i -й неисключенной систематической погрешности, соответствующая доверительной вероятности P_i ; K и K_i — коэффициенты, соответствующие доверительным вероятностям P и P_i соответственно.

Значения коэффициентов K и K_i определяются по тем же правилам, как и в формуле (3.3).

Случай 3. Имеются только случайные составляющие погрешности, заданные средними квадратическими отклонениями (СКО), взятыми, например, из технической документации СИ.

В этом случае СКО результата однократного измерения $\sigma(\tilde{A})$ оценивают по следующей формуле:

$$\sigma(\tilde{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}, \quad (3.5)$$

где σ_i — СКО случайных составляющих погрешностей измерения; m — число случайных составляющих погрешностей измерения.

Доверительные границы случайной погрешности результата измерения вычисляют по формуле

$$\overset{\circ}{\Delta}(P) = z(P)\sigma(\tilde{A}) = z(P)\sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}, \quad (3.6)$$

где $z(P)$ — аргумент функции Лапласа для соответствующей доверительной вероятности (см. приложение 4).

Случай 4. Имеются только случайные составляющие, задаваемые СКО, полученными экспериментально при числе измерений $n < 30$. Для этого случая

$$\overset{\circ}{\Delta}(P) = t(P, n)\sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}, \quad (3.7)$$

где $t(P, n)$ — коэффициент Стьюдента, определяемый по заданным P и числу n (см. приложение 5).

Случай 5. Имеются только случайные составляющие погрешности, задаваемые доверительными границами $\overset{\circ}{\Delta}_i(P)$, соответствующими одинаковой доверительной вероятности. Значение доверительных границ результата измерения рассчитывается по формуле

$$\overset{\circ}{\Delta}(P) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \overset{\circ}{\Delta}_i^2(P)}. \quad (3.8)$$

Случай 6. Имеются только случайные составляющие погрешности, задаваемые доверительными границами $\overset{\circ}{\Delta}_i(P_i)$ с различными довери-

тельными вероятностями. Для этого случая

$$\overset{\circ}{\Delta}(P) = z(P) \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\overset{\circ}{\Delta}_i^2(P_i)}{z^2(P_i)}} = z(P) \sigma(\tilde{A}), \quad (3.9)$$

где $z(P)$, $z(P_i)$ — аргументы функции Лапласа.

Случай 7. Имеются систематические и случайные составляющие погрешности. В этом случае порядок определения погрешности результата измерения зависит от соотношения $\Delta_c(P)/\sigma(\tilde{A})$.

Если $\Delta_c(P)/\sigma(\tilde{A}) < 0,8$, то в качестве погрешности результата измерения принимаются доверительные границы случайных погрешностей.

Если $\Delta_c(P)/\sigma(\tilde{A}) > 8$, то в качестве погрешности результата измерения принимаются границы неисключенных систематических погрешностей.

Если $0,8 \leq \Delta_c(P)/\sigma(\tilde{A}) \leq 8$, то доверительную границу погрешности результата измерения вычисляют по формуле

$$\Delta(P) = K_1 [\Delta_c(P) + \overset{\circ}{\Delta}(P)]. \quad (3.10)$$

Значения K_1 для доверительных вероятностей 0,95 и 0,99 представлены в табл. 3.1.

Во всех рассмотренных случаях форма представления результатов однократных измерений должна соответствовать МИ 1317. При симметричной доверительной погрешности результат однократного измерения представляется в форме

$$A_1; \pm \Delta; P \text{ или } A_1 \pm \Delta; P. \quad (3.11)$$

Пример 1. Измерение напряжения U_x проводилось на резисторе $R = 10$ Ом при температуре воздуха в помещении 30°C вольтметром, имеющим равномерную шкалу от 0 до 15 В и входное сопротивление 2000 Ом. Погрешность прибора определяется по формуле

$$\pm(0,2 + 0,8/U_x) \%$$

Стрелка прибора остановилась на отметке 2 В. Определить результат измерения.

Основная относительная погрешность

$$\delta_o = \pm(0,2 + 0,8/2) = \pm 0,6 \%;$$

что в абсолютной форме составляет $\pm 0,072$ В.

Дополнительная температурная погрешность, определенная по паспортным данным прибора, $\delta_T = \pm 0,1 \%$.

Таблица 3.1

Выбор коэффициента K_1

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

При доверительной вероятности $P = 0,95$ и $m = 2$ $K = 1,1$. Следовательно, инструментальная погрешность

$$\delta(P) = 1,1 \sqrt{0,6^2 + 0,1^2} = \pm 0,67 \%,$$

что в абсолютной форме составляет $\pm 0,013$ В.

Методическая погрешность определяется соотношением сопротивления участка цепи ($R = 10$ Ом) и входного сопротивления вольтметра ($R_V = 2000$ Ом):

$$\Delta_m = -\frac{RU_x}{R + R_V} = \frac{10 \cdot 2}{10 + 2000} = -0,01 \text{ В.}$$

С учетом методической погрешности в виде поправки $U_x = 2,01$ В.

Результат измерения $U_x = (2,01 \pm 0,01)$ В; $P = 0,95$.

Пример 2. У милливольтметра с равномерной шкалой и верхним пределом измерения 50 мВ при измерении напряжения стрелка остановилась на отметке 20 мВ. Измерение проводилось при температуре 22°C и напряженности магнитного поля 380 А/м. Среднее квадратическое отклонение результата измерения составляет одну треть основной погрешности. Основная погрешность (приведенная) равна 1 % верхнего предела измерения прибора. Методическая погрешность отсутствует. Определить результат измерения.

Основная абсолютная инструментальная погрешность

$$\Delta_o = \frac{\gamma_{x_n}}{100} = \frac{1 \% \cdot 50}{100 \%} = \pm 0,5 \text{ мВ.}$$

Основная относительная инструментальная погрешность

$$\delta_o = \frac{\Delta}{x} \cdot 100 \% = \frac{0,5}{20} \cdot 100 \% = \pm 2,5 \.%$$

Дополнительная погрешность вследствие влияния внешнего магнитного поля определена по паспортным данным прибора и составляет $\delta_d = \pm 0,5 \%$.

Суммарная неисключенная инструментальная систематическая погрешность при доверительной вероятности $P = 0,9$

$$\delta(P) = 0,95 \sqrt{\delta_o^2 + \delta_d^2} = 0,95 \sqrt{2,5^2 + 0,5^2} = \pm 2,42 \.%$$

В абсолютной форме $\Delta_c(P) = \pm 0,48$ В.

Доверительные границы случайной составляющей погрешности для доверительной вероятности $P = 0,9$

$$\overset{\circ}{\Delta}(P) = \pm z(P) \sigma(\overset{\circ}{\Delta}) = \pm 1,65 \cdot 0,17 = 0,28 \text{ мВ.}$$

Рассчитаем отношение

$$\Delta_c(P) / \sigma \overset{\circ}{\Delta} = 0,48 / 0,17 = 2,82.$$

Погрешность результата измерения

$$\Delta(P) = K_1 [\Delta_c(P) + \overset{\circ}{\Delta}(P)] = \pm 0,95 (0,48 + 0,28) = \pm 0,72 \text{ мВ.}$$

Результат измерения $U_x = (20 \pm 0,72)$ мВ; $P = 0,9$.

3.3.2. Особенности определения инструментальной составляющей погрешности измерений по нормируемым метрологическим характеристикам средств измерений

В соответствии с методикой оценивания погрешностей результатов прямых однократных измерений МИ 1552-86, если погрешность метода

и оператора не превышают 15 % погрешности СИ, то за погрешность результата измерения допускается брать погрешность СИ, которую можно определить на основе их нормированных метрологических характеристик, рассматриваемых в ГОСТ 8.009.84 (см. разд. 2.2).

Методические указания, устанавливающие порядок расчета погрешностей СИ по нормируемым метрологическим характеристикам, изложены в РД 50-453-84 «Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации».

В зависимости от решаемой измерительной задачи, экономической целесообразности и имеющейся исходной информации для расчета характеристик погрешности СИ рекомендуется использовать один из двух методов определения инструментальной составляющей погрешности Δ_m .

Первый метод (с существенной случайной составляющей основной погрешности) заключается в статистическом объединении всех составляющих погрешности СИ

$$\Delta_{m1} = \Delta_{OS} * \overset{\circ}{\Delta}_0 * \overset{\circ}{\Delta}_{0H} * \sum_{i=1}^l \Delta_{ci} * \Delta_{дин}, \quad (3.12)$$

где Δ_{OS} — систематическая составляющая основной погрешности; $\overset{\circ}{\Delta}_0$ — случайная составляющая основной погрешности; $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$ — случайная составляющая основной погрешности, обусловленная гистерезисом; $\sum_{i=1}^l \Delta_{ci}$ — объединение дополнительных погрешностей, обусловленных действием влияющих величин; $\Delta_{дин}$ — динамическая погрешность СИ; l — число учитываемых дополнительных погрешностей; $*$ — знак статистического объединения.

В качестве исходных данных для расчета погрешности СИ данным методом используют следующие три группы характеристик (см. разд. 2.2.2):

- нормированные метрологические характеристики СИ;
- характеристики влияющих величин;
- характеристики входного сигнала.

Результат расчета погрешности СИ по указанным характеристикам сводится в конечном итоге к оцениванию интервала, в котором инструментальная составляющая погрешности Δ_{m1} находится с доверительной вероятностью меньше единицы.

Второй метод (с несущественными случайными составляющими) включает в себя расчет наибольших возможных значений погрешности СИ (Δ_{m2}) и не предполагает статистического объединения составляющих погрешностей. Инструментальная погрешность определяется как арифметическая сумма наибольших возможных значений ее составляющих. Такой подход позволяет определить доверительный интервал, в котором искомая инструментальная погрешность находится с вероятностью равной единице.

Второй метод рекомендуется использовать при наиболее ответственных измерениях, т.е. когда снижение требований к точности может привести к угрозе здоровью и жизни людей или к серьезным отрицательным экономическим или техническим последствиям.

В качестве исходных данных используются те же три группы характеристик, что и в первом методе, однако для расчета используются в основном предельные и граничные значения характеристик, т.е. те, которые обеспечивают расчет результирующей инструментальной погрешности с вероятностью равной единице.

Конкретные алгоритмы расчета и используемые расчетные формулы в обоих методах определяют в зависимости от известных исходных данных для расчета, условий и метода измерения. Примеры расчетов приведены в РД 50-453-84.

3.3.3. Определение инструментальной составляющей погрешности по классу точности средств измерений

Рассмотренный в разд. 3.3.2 подход к оцениванию инструментальной погрешности по нормируемым метрологическим характеристикам в соответствии с ГОСТ 8.009-84 дает хорошие возможности для их расчета с учетом реальных условий эксплуатации СИ. Однако для большого количества СИ, находящихся в эксплуатации, погрешность определяется по классу точности в соответствии с ГОСТ 8.401-80.

Информация о пределе допускаемой основной погрешности конкретного СИ заложена в условных обозначениях его класса точности или приводится в нормативно-технической документации. Правила и примеры обозначения классов точности приведены в табл. 3.2.

Если для СИ нормируется предел допускаемой основной абсолютной погрешности по формулам (2.28) и (2.29), то класс точности обозначается буквами латинского алфавита или римскими цифрами, например, М, С, L,... или I, II,...

Примером измерительного прибора с классом точности, выражаемым с помощью букв латинского алфавита, может служить измеритель фазового сдвига.

Для СИ, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме относительных погрешностей по формуле (2.30), классы точности обозначают числами в кружках, которые численно равны пределу относительной погрешности $\delta_{\text{п}}$ в процентах, а если используется формула (2.32), то классы точности обозначают числами s и d , разделяя их косой чертой.

Классы точности СИ, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме приведенной погрешности (2.34), обозначают арабскими цифрами или арабскими цифрами с добавлением какого-либо условного знака. Значения указанных чисел равны пределу допускаемой приведенной погрешности, выраженной в процентах. Если,

Таблица 3.2

Примеры обозначения классов точности

Обозначение класса точности	Форма выражения предела допускаемой погрешности		
	Абсолютная (Δ_n), ед. изм. физичес- кой величины	Относительная (δ_n), %	Приведенная (γ_n), %
M C	$\Delta_n = \pm a$; $\Delta_n = \pm(a + bx)$, a, b — положи- тельные числа	Значение предела указывается в нормативно-технической документации на данный тип СИ	
Q (1,0)	$\Delta_n = \pm q \frac{x}{100}$	$\delta_n = \frac{\Delta_n}{x} \cdot 100 = \pm q$	$\gamma_n = \pm q \frac{x}{x_n}$
c/d 0,02/0,01	$\Delta_n = \pm \delta_n \frac{x}{100}$	$\delta_n = \frac{\Delta_n}{x} \cdot 100 =$ $= \pm \left[c + d \left(\left\lceil \frac{x_k}{x} \right\rceil - 1 \right) \right]$ x_k — верхний предел измерений	$\gamma_n = \pm \delta_n \frac{x}{x_n}$
p 1,5	$\Delta_n = \pm p \frac{x_n}{100}$	$\delta_n = \pm p \frac{x_n}{x}$	$\gamma_n = \frac{\Delta_n}{x_n} \cdot 100 = \pm p$; x_n — в единицах измеряемой величины
$\underbrace{p}_{1,5}$	$\Delta_n = \pm p \frac{x_n}{100}$	$\delta_n = \pm p \frac{x_n}{x}$	$\gamma_n = \frac{\Delta_n}{x_n} \cdot 100 = \pm p$; x_n определяется длиной шкалы

например, арабская цифра заключена в уголок, то в формуле (2.34) x_n определяется длиной шкалы или ее частью, соответствующей диапазону измерений. Общий подход к определению x_n дается в табл. 2.4.

Для электроизмерительных приборов в соответствии с рядом (2.33) установлены девять классов точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0, а для вспомогательных устройств (шунтов, добавочных резисторов и др.) — семь классов точности: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0.

Сопоставляя при одной и той же величине допускаемой абсолютной погрешности Δ_n выражения (2.30) и (2.34), получим следующее соотношение между приведенной и относительной погрешностями:

$$\delta = \frac{x_n}{x} \gamma. \quad (3.13)$$

Из (3.13) следует, что при нормировании по приведенной погрешности относительная погрешность измерения тем меньше, чем ближе измеряемая величина к нормирующему значению, т.е. СИ класса точности p не обеспечивают во всем диапазоне измерения одинаковой погрешности, поэтому при выборе СИ необходимо учитывать не только их классы точности, но и соотношение x_n/x . Рекомендуется предел измерения выбирать таким, чтобы показания измерительного прибора находились

ближе к верхнему пределу его поддиапазона.

Из рассмотренного перечня характеристик для конкретных СИ выбирают такие, которые достаточны для оценки погрешности измерений. Нормы на отдельные метрологические характеристики приводят в эксплуатационной документации (паспорте, техническом описании, инструкции по эксплуатации) СИ.

Пример. Вольтметр имеет равномерную шкалу от 0 до 100 В. Определить значение измеряемого напряжения, а также абсолютную, относительную и приведенные инструментальные погрешности измерения, если стрелка прибора установилась на отметке 50 В. Дополнительная погрешность отсутствует.

Задачу решить для классов точности, обозначенных следующими символами: 1,0; 1,0, 0,02/0,01.

а) Класс точности измерительных приборов, обозначаемых арабскими числами 1,0, соответствует пределу допускаемой приведенной погрешности, т.е. $\gamma_n = \pm 1\%$. По определению,

$$\gamma_n = \frac{\Delta_n}{x_n} \cdot 100\%, \text{ тогда } \Delta_n = \pm \frac{\gamma_n x_n}{100\%}.$$

При нулевой отметке на краю шкалы нормирующее значение x_n определяется верхним пределом измерения (100 В):

$$\Delta_n = \frac{1\% \cdot 100}{100\%} = \pm 1 \text{ В}.$$

По определению,

$$\delta_n = \frac{\Delta_n}{x} \cdot 100\% = \frac{\gamma_n x_n \cdot 100\%}{100\% \cdot x} = \frac{\gamma_n x_n}{x} = \pm 2\%.$$

Значение измеряемого напряжения $U_x = (50 \pm 1) \text{ В}$.

б) При обозначении класса точности цифрой в круге нормируется предел допускаемой относительной погрешности, т.е. $\delta_n = 1\%$,

$$\Delta_n = \frac{\delta_n x}{100} = \frac{1\% \cdot 50}{100\%} = \pm 0,5 \text{ В},$$

где x — значение измеренного вольтметром напряжения;

$$\gamma_n = \frac{\delta_n x}{x_n} = \frac{1\% \cdot 50}{100} = 0,5\%,$$

$U_x = (50 \pm 0,5) \text{ В}$.

в) При обозначении класса точности 0,02/0,01

$$\delta_n = [c + d(|x_k|/|x| - 1)] = [0,02 + 0,01(100/50 - 1)] = 0,03\%,$$

$$\Delta_n = \frac{\delta_n x}{100} = \frac{0,03 \cdot 50}{100} = \pm 0,015 \text{ В},$$

$$U_x = (50 \pm 0,015) \text{ В}.$$

3.4. Обработка результатов прямых многократных измерений

При эксплуатации средств связи в некоторых случаях согласно нормативной документации требуется проводить прямые измерения с многократными наблюдениями, определять результаты и давать статистическую оценку погрешности измерений. Методика выполнения прямых измерений с многократными независимыми наблюдениями и основные

положения обработки результатов установлены ГОСТ 8.207-76 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения».

Измерения называются равноточными, если они выполнены одинаковыми по точности СИ, одним оператором и в одних и тех же условиях. Формальным признаком равноточности может быть равенство среднеквадратических погрешностей (σ) всех серий измерений.

Общая процедура обработки прямых многократных равноточных измерений представлена в виде алгоритма на рис. 3.1, где рассматриваются как среднеквадратическая, так и доверительная (интервальная) оценки случайных погрешностей.

Исходными данными для расчета является серия из n результатов равноточных наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$, а также доверительная вероятность P_d .

Оценка наличия и, при необходимости, исключение известной систематической погрешности из результатов наблюдения (шаги 3, 4) основаны на знании свойств используемого СИ, метода измерений и условий измерений (см. разд. 3.1).

На пятом шаге рассматриваемой процедуры находится среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, которое принимается за наиболее вероятный результат измерения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.14)$$

При нормальной функции распределения среднее арифметическое является наилучшим приближением к истинному (действительному) значению измеряемой величины. Следовательно погрешность при каждой i -й процедуре наблюдения будет определяться формулой

$$\Delta_i = x_i - \bar{x}, \quad (3.15)$$

Шестой шаг предусматривает вычисление оценки СКО результата однократного измерения $\hat{\sigma}$.

С учетом введенных ограничений (3.15) оценка значения среднеквадратической погрешности данного ряда измерений находится по формуле

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.16)$$

Проверка наличия и, при необходимости, исключение грубых погрешностей (шаги 7, 8) проводится в соответствии с методикой, изложенной в разд. 3.2.

При конечном значении числа наблюдений среднее арифметическое, найденное по формуле (3.14), отличается от истинного среднего

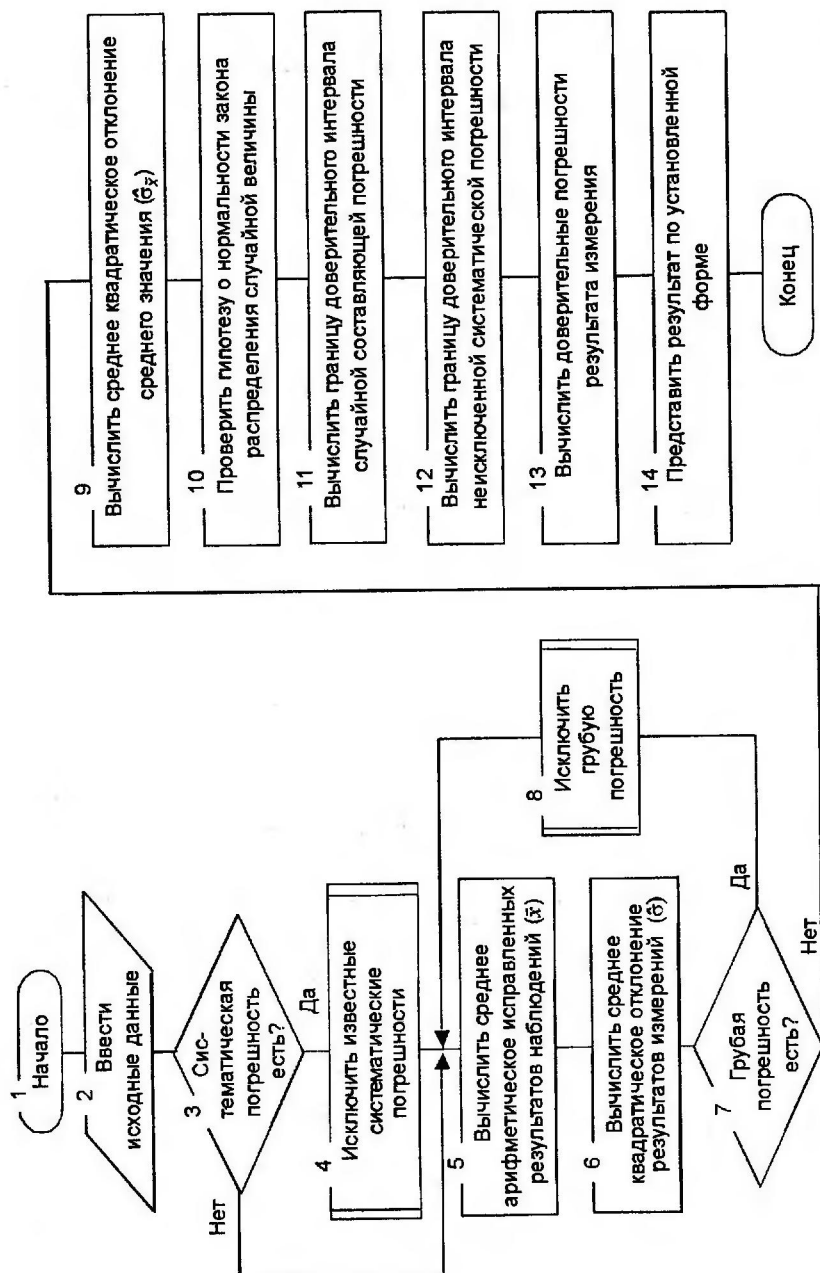


Рис. 3.1. Алгоритм обработки прямых многократных равнооточных измерений

арифметического, т.е. $\bar{x}$ также является случайной величиной. Поэтому находится среднеквадратическое отклонение среднего арифметического значения.

На девятом шаге выполняется оценка СКО среднего значения результатов измерения, характеризующего степень разброса $\bar{x}$:

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \hat{\sigma} / \sqrt{n}. \quad (3.17)$$

Значение $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ характеризует степень разброса $\bar{x}$. Так как $\bar{x}$ выступает оценкой истинного значения измеряемой величины $x_{\text{и}}$, т.е. является конечным результатом выполняемых измерений, то $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ называют также средней квадратической погрешностью результата измерений.

На практике значением $\hat{\sigma}$ пользуются в тех случаях, когда нужно дать оценку точности применяемого метода измерения. Действительно, если метод точен, то разброс результатов отдельных измерений мал, т.е. мало значение $\hat{\sigma}$. Значение $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ используется для характеристики точности результата измерений некоторой величины, т.е. результата, полученного посредством математической обработки итогов целого ряда отдельных прямых измерений.

Таким образом, как следует из (3.17), при увеличении числа наблюдений (при независимых результатах) точность увеличивается пропорционально $\sqrt{n}$. В общем случае число наблюдений необходимо увеличивать до тех пор, пока $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ не станет меньше систематической погрешности прибора.

Приступая к доверительной оценке случайных погрешностей, отметим, что доверительный интервал, в котором случайная погрешность измерения находится с заданной вероятностью, является показателем точности измерения. Для его нахождения прежде всего проводится проверка гипотезы о соответствии экспериментальных данных нормальному закону распределения вероятности результата измерения (шаг 10). Методики проверки указанной гипотезы общеизвестны. При числе наблюдений $n > 50$ для проверки их принадлежности к нормальному распределению предпочтительным является критерий χ^2 Пирсона или ω^2 Мизеса-Смирнова. При числе наблюдений $50 > n > 15$ рекомендуется использовать составной критерий.

При подтверждении гипотезы о нормальности закона распределения вычисляют границы доверительного интервала случайной составляющей погрешности (шаг 11). Принято считать, что если число наблюдений $n > 30$, то значение интеграла необходимо вычислять через функцию Лапласа. Для заданных значений $P_{\text{д}}$ по табулированным значениям функции Лапласа $\Phi(z) = P_{\text{д}}$ (приложение 4) находят значения $z(P_{\text{д}})$, а учитывая, что $z(P_{\text{д}}) = \Delta / \hat{\sigma}_{\bar{x}}$, границы доверительного интервала определяют по формулам:

$$\begin{aligned} x_{\text{в}} &= \bar{x} + z(P_{\text{д}}) \hat{\sigma}_{\bar{x}}, \\ x_{\text{н}} &= \bar{x} - z(P_{\text{д}}) \hat{\sigma}_{\bar{x}}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Если число отсчетов $n \leq 30$, но суждение о нормальности распределения остается справедливым, то используют распределение Стьюдента. Для заданных значений P_d и n по таблицам распределения Стьюдента (приложение 5) находят коэффициент $t(n, P_d)$, а затем вычисляют верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала:

$$\begin{aligned} x_B &= \bar{x} + \hat{\sigma}_{\bar{x}} t(n, P_d), \\ x_H &= \bar{x} - \hat{\sigma}_{\bar{x}} t(n, P_d). \end{aligned} \quad (3.19)$$

Если закон распределения вероятности результата измерения незначительно отличается от нормального, то применяют так называемые робастные методы обработки экспериментальных данных, что в частном случае приводит к усредненному нормальному закону распределения вероятности результата измерения. Мерой рассеяния в этом случае может быть сумма отклонений от среднего значения или некоторая ее функция.

При особо точных и ответственных измерениях, если гипотеза о нормальности закона распределения не подтверждается, может быть поставлена задача определения закона распределения вероятности результата измерения, которая решается на основе методики измерений МИ 199-79. Однако следует помнить, что это сложная и трудоемкая процедура.

Порядок определения границ неисключенных составляющих систематической погрешности (шаг 12) зависит прежде всего от условий эксперимента. Если имеются несколько неисключенных составляющих систематической погрешности и известны их границы Δ_{ci} , то распределение этих составляющих в пределах границ принято считать равномерным, а суммарная доверительная граница определяется по формуле (3.3).

Результирующие доверительные границы погрешности результата измерения (шаг 13) определяют в соответствии с правилом, изложенным в разд. 3.3.1, по формуле (3.10).

Интервал, в котором погрешность измерения находится с заданной вероятностью, является показателем точности измерения и выражается (шаг 14) в форме

$$A; \Delta_H; \Delta_B; P_d, \quad (3.20)$$

где A — результат измерения в единицах измеряемой величины; Δ_H, Δ_B — соответственно погрешность измерения с нижней и верхней ее границами в тех же единицах измерения; P_d — доверительная вероятность.

Пример. В процессе измерения получено 10 отсчетов измеряемой величины (уровень сигнала в дБ):

$$\begin{aligned} x_1 &= 72,36; x_2 = 72,35; x_3 = 72,35; x_4 = 72,34; x_5 = 72,33; \\ x_6 &= 72,37; x_7 = 72,36; x_8 = 72,35; x_9 = 72,35; x_{10} = 72,36. \end{aligned}$$

Определить результат измерения, если $P_d = 0,95$. Систематической погрешностью пренебречь. Распределение результатов отсчетов считать нормальным.

Решение.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 72,352;$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,011;$$

$$\hat{\sigma}_x = \hat{\sigma} / \sqrt{n} = 0,003.$$

Результат $\bar{x} = 72,35$ дБ, $\hat{\sigma}_x = 0,003$ дБ.

По таблице приложения 5 находим $t(n, P_d) = t(10; 0,95) = 2,26$.

Границы доверительного интервала: $x_H = 72,35 - 2,26 \cdot 0,003 = 72,34$; $x_B = 72,35 + 2,26 \cdot 0,003 = 72,36$.

Результат: $A = 72,35$ дБ; $\Delta_H = -0,01$ дБ; $\Delta_B = +0,01$ дБ; $P_d = 0,95$.

Особенности обработки многократных неравноточных измерений. Группы измерений называют неравноточными, если характеристики погрешностей этих групп различны ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \dots \sigma_n$).

В качестве оценки результата измерения в данном случае берется весовое среднее $\bar{x}_p$ (арифметическая середина).

Если в результате многократных неравноточных измерений получены серии результатов $x_1, x_2, \dots, x_n$ со среднеквадратическими погрешностями $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, то значение $\bar{x}_p$ может быть найдено по формуле

$$\bar{x}_p = \frac{\frac{1}{\sigma_1^2} x_1 + \frac{1}{\sigma_2^2} x_2 + \dots + \frac{1}{\sigma_n^2} x_n}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{\sigma_n^2}}, \quad (3.21)$$

или по формуле

$$\bar{x}_p = \frac{p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n}, \quad (3.22)$$

которая получается из (3.21), если числитель и знаменатель умножить на некоторый коэффициент μ^2 .

Величину $p_i = \mu^2 / \sigma_i^2$ называют весом, при этом μ^2 выбирают так, чтобы p_i была ближе к единице ($i = \overline{1, n}$).

Таким образом, при определении среднего взвешенного $\bar{x}_p$ вес p_i обратно пропорционален соответствующей дисперсии σ_i^2 , тем самым более точным значениям измерений придается больший вес.

В случаях, когда значение σ_i неизвестно, а известно число измерений n в серии, $\bar{x}_p$ рассчитывают по формуле

$$\bar{x}_p = \frac{\bar{x}_1 n_1 + \bar{x}_2 n_2 + \dots + \bar{x}_n n_n}{n_1 + n_2 + \dots + n_n},$$

где $\bar{x}_i$ — среднее арифметическое i -й серии измерений.

При использовании формулы (3.22) должно выполняться условие

$$p_1 : p_2 : \dots : p_n = n_1 : n_2 : \dots : n_n.$$

Среднеквадратическая погрешность единицы веса при неравноточных измерениях определяется по формуле

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_p)^2 p_i},$$

а среднеквадратическая погрешность среднего весового значения — по формуле

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \hat{\sigma} / \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i}.$$

3.5. Определение результата и погрешностей косвенных измерений

Напомним, что косвенные измерения — это измерения, при которых искомое значение величины A находят путем согласованных измерений других величин $a_1, a_2, \dots, a_m$, связанных с измеряемой величиной известной функциональной зависимостью

$$A = \varphi(a_1, a_2, \dots, a_m). \quad (3.23)$$

Наиболее часто потребность в оценке погрешностей косвенных измерений в телекоммуникационных системах возникает при косвенном измерении энергетических и силовых величин или параметров элементов и цепей радиоэлектронных устройств. Кроме того, такая задача может возникнуть в случаях, когда прямопоказывающий прибор не может быть присоединен непосредственно к объекту измерения, а включается через некоторые промежуточные элементы, параметры которых определены или известны с некоторыми погрешностями. Например, при измерении мощности в волноводном тракте ваттметр подключается через ответвители и аттенюаторы, которые вносят затухание, известное оператору с некоторыми погрешностями.

Если величины $a_1, a_2, \dots, a_n$ измерены с абсолютными погрешностями $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n$, то результат вычисления величины A также будет содержать погрешность $\Delta(A)$, т.е.

$$A = A_0 \pm \Delta(A) = \varphi(a_1 \pm \Delta a_1, a_2 \pm \Delta a_2, \dots, a_n \pm \Delta a_n), \quad (3.24)$$

где A_0 — оценка результата косвенного измерения; $a_1, a_2, \dots, a_n$ — оценки результатов измерения аргументов.

Таким образом, из (3.24) следует, что задача определения погрешностей косвенных измерений сводится к задаче определения погрешности функции при известных значениях погрешностей аргументов.

При нелинейных зависимостях и некоррелированных погрешностях аргументов для нахождения погрешности функции используют метод линеаризации, который предполагает разложение нелинейной функции в ряд Тейлора:

$$A = \varphi(a_1, a_2, \dots, a_n) + \frac{d\varphi(a_1, \dots, a_n)}{da_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{d\varphi(a_1, \dots, a_n)}{da_n} \Delta a_n + \\ + \frac{1}{2} \left[\frac{d^2\varphi(a_1, \dots, a_n)}{da_1^2} (\Delta a_1)^2 + \dots + \frac{d^2\varphi(a_1, \dots, a_n)}{da_n^2} (\Delta a_n)^2 + \right. \\ \left. + 2 \frac{d^2\varphi(a_1, \dots, a_n)}{da_1 da_2} \Delta a_1 \Delta a_2 + \dots + 2 \frac{d^2\varphi(a_1, \dots, a_n)}{da_{n-1} da_n} \Delta a_{n-1} \Delta a_n \right] + \dots \quad (3.25)$$

Из равенства (3.25) следует, что члены ряда, начиная со второго, составляют погрешность функции, т.е.

$$\Delta(A) = \sum_{i=1}^n \frac{d\varphi(a_1, \dots, a_n)}{da_i} \Delta a_i + R, \quad (3.26)$$

где R — остаточный член ряда.

Заметим, что Δa_i в (3.25) и (3.26), представляющие отклонение результата измерения аргумента a_i от его среднего арифметического значения, могут иметь смысл как систематических Δ_{ci} , так и случайных Δ_i составляющих погрешностей. Кроме того, если Δa_i малы, а их произведения и квадраты дают значения второго порядка малости, то остаточным членом R пренебрегают. (Более строгие условия исключения R приведены в МИ 2083 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей».)

Основываясь на (3.26), рассмотрим три частных случая.

Случай 1. Погрешности аргументов носят характер систематических погрешностей.

В этом случае, если неисключенные систематические погрешности аргументов заданы границами Δ_{ci} , то доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата косвенных измерений $\Delta_c(P)$ (без учета знака) с вероятностью P вычисляют по следующей формуле:

$$\Delta_c(P) = K \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{d\varphi}{da_i} \right)^2 \Delta_{ci}^2}, \quad (3.27)$$

где K — поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом m составляющих Δ_{ci} (см. формулу (3.3)).

Если границы неисключенных систематических погрешностей результатов измерений аргументов заданы доверительными границами, то

границы неисключенной систематической погрешности результата косвенных измерений с вероятностью P вычисляют (без учета знака) по формуле

$$\Delta_c(P) = K \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{d\varphi}{da_i} \right)^2 \frac{\Delta_{ci}^2(P)}{K_i^2}}, \quad (3.28)$$

где коэффициенты K и K_i определяются так же, как и коэффициент K в формуле (3.27).

Случай 2. Погрешности аргументов имеют характер случайных погрешностей.

В этом случае среднее квадратическое отклонение случайной погрешности результата косвенных измерений $\sigma(\tilde{A})$ вычисляют по формуле

$$\sigma(\tilde{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{d\varphi}{da_i} \right)^2 \sigma^2(a_i)}, \quad (3.29)$$

где $\sigma(a_i)$ — среднее квадратическое отклонение результата измерений аргумента a_i .

Доверительные границы случайной погрешности результата косвенных измерений при условии, что распределения погрешностей результатов измерений всех аргументов имеют нормальное распределение, вычисляют (без учета знака) по формуле

$$\overset{\circ}{\Delta}(P) = t(n, P_d) \sigma(\tilde{A}), \quad (3.30)$$

где $t(n, P_d)$ — коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности P_d и числу $n = f_{\text{э}} + 1$; $f_{\text{э}}$ — эффективное число степеней свободы распределения Стьюдента, вычисляемое по формуле

$$f_{\text{э}} = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{d\varphi}{da_i} \right)^2 \sigma^2(\tilde{a}_i) \right]^2 - 2 \left[\sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i + 1} \left(\frac{d\varphi}{da_i} \right)^4 \sigma^4(\tilde{a}_i) \right]}{\left[\sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i + 1} \left(\frac{d\varphi}{da_i} \right)^4 \sigma^4(\tilde{a}_i) \right]}, \quad (3.31)$$

где n_i — число измерений при определении аргумента $\tilde{a}_i$.

Случай 3. Результат измерения содержит систематические и случайные погрешности.

В этом случае погрешность результата косвенных измерений оценивается на основе композиции распределений случайных и систематических погрешностей и зависит от соотношения $\Delta_c(P)/\sigma(\tilde{A})$. Методика определения погрешности результата косвенного измерения аналогична методике оценивания погрешности результата прямого измерения, определяемая соотношением $\Delta_c(P)/\sigma(\overset{\circ}{\Delta})$ и рассмотренной в разд. 3.3.1.

Из рассмотренной процедуры оценивания погрешностей косвенных измерений выделим частный случай, когда функциональная зависимость (3.23) имеет линейный характер:

$$A = b_1 a_1 + b_2 a_2 + \dots + b_m a_m, \quad (3.32)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_m$ — измеряемые аргументы; $b_1, b_2, \dots, b_m$ — постоянные коэффициенты при соответствующих аргументах.

При отсутствии корреляции между погрешностями измерений аргументов результат косвенных измерений $\tilde{A}$ вычисляется по формуле

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^m b_i \tilde{a}_i. \quad (3.33)$$

Систематические и случайные погрешности косвенного измерения рассчитывают по формулам, аналогичным формулам (3.27), (3.28), (3.29) и (3.30) соответственно, в которых частные производные $d\varphi/da_1, d\varphi/da_2, \dots, d\varphi/da_m$ следует заменить на коэффициенты $b_1, b_2, \dots, b_m$:

$$\Delta_c(P) = K \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \Delta_{ci}^2}; \quad (3.34)$$

$$\Delta_c(P) = K \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \frac{\Delta_{ci}^2(P)}{K_i^2}}; \quad (3.35)$$

$$\sigma(\tilde{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \sigma^2(a_i)}; \quad (3.36)$$

$$\hat{\Delta}(P) = t(n, P_d) \sigma(\tilde{A}). \quad (3.37)$$

Доверительные границы погрешности результата косвенного измерения определяется в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207-76 (см. разд. 3.3.1).

При наличии корреляции между погрешностями измерений аргументов для определения результатов косвенных измерений и их погрешностей рекомендуется использовать метод приведения ряда отдельных значений косвенно измеряемой величины к ряду прямых измерений (МИ 2083).

Этот метод предполагает согласованное многократное измерение m аргументов ($a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1L}; a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2L}; a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mL}$), функционально связанных с искомой величиной уравнением (3.23). Полученные сочетания отдельных результатов измерений аргументов ($a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1L}; a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2L}; a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mL}$) подставляют в формулу (3.23) и вычисляют отдельные значения искомой величины ($A_1,$

$A_2, \dots, A_L$). Результат косвенных измерений вычисляется по формуле

$$\tilde{A} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L A_i, \quad (3.39)$$

где A_i — отдельное значение измеряемой величины, полученное в результате подстановки i -го сочетания согласованных результатов измерений аргументов в формулу (3.23); L — число отдельных значений измеряемой величины.

Среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей результата косвенных измерений $\sigma(\tilde{A})$ и доверительные границы случайных погрешностей $\overset{\circ}{\Delta}(P)$ определяют по формулам, аналогичным расчету этих величин при прямых измерениях:

$$\sigma(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{1}{L(L-1)} \sum_{i=1}^L (A_i - \tilde{A})^2}; \quad (3.39)$$

$$\overset{\circ}{\Delta}(P) = T\sigma(\tilde{A}), \quad (3.40)$$

где T — коэффициент, зависящий от вида распределения отдельных значений измеряемой величины A и выбранной доверительной вероятности.

Границы неисключенной систематической погрешности результата косвенных измерений определяются по тем же правилам, как и при отсутствии корреляции между погрешностями измерений аргументов.

Пример. Определить мощность, рассеиваемую на сопротивлении $R = 50 \text{ Ом} \pm 1 \%$, путем измерения тока. Результат измерения тока $I = 0,6 \text{ А} \pm 1,5 \%$. Оценить точность определения мощности, полагая, что погрешности имеют систематический характер.

В данном случае функция влияния имеет вид $P = I^2 R$.

Результат измерения мощности

$$P = (I^2 R) \pm \Delta_P = 18 \text{ Вт} \pm \Delta_P.$$

Абсолютная погрешность измерения тока при заданной относительной погрешности $\delta_I = \pm 1,5 \%$

$$\Delta_I = (0,6 \cdot 1,5)/100 = \pm 0,009 \text{ А}.$$

Абсолютный допуск на сопротивление

$$\Delta_R = (50 \cdot 1)/100 = \pm 0,5 \text{ Ом}.$$

В соответствии с (3.27) абсолютная погрешность измерения мощности определяется по формуле

$$\Delta_c(P) = \pm K \sqrt{\left(\frac{dP}{dI}\right)^2 \Delta_I^2 + \left(\frac{dP}{dR}\right)^2 \Delta_R^2}.$$

Взяв частные производные и подставив соответствующие числовые значения, получим

$$\Delta_c(P) = \pm K \sqrt{(2IR)^2 \Delta_I^2 + (I^2)^2 \Delta_R^2} = \pm 0,62 \text{ Вт}.$$

Значение K взято равным 1,1 при $P = 0,95$.

Относительная погрешность $\delta_P = \Delta_c(P)/P = \pm 0,62/18 = \pm 0,03 = \pm 3 \%$.

Таким образом, $P = (18 \pm 0,62)$ Вт.

3.6. Приближенные вычисления при обработке результатов измерений

При обработке результатов измерений (наблюдений) расчеты выполняют, как правило, с приближенными значениями величин (числами) в условиях, когда их точные значения остаются неизвестными. Поэтому при расчетах к случайным погрешностям измерения исходных величин добавляются погрешности округления. Для всех приближенных чисел так же, как и для результатов измерений, введены понятия абсолютной и относительной погрешностей.

Пусть $x_{\text{и}}$ — точное (истинное) значение некоторого числа, x — известное приближенное значение этого же числа. За абсолютную погрешность берется разность

$$|x_{\text{и}} - x| = \Delta(x). \quad (3.41)$$

По величине абсолютной погрешности не всегда можно сделать правильное заключение о качестве приближения, поэтому, чтобы правильно соотнести погрешность числа, вводится понятие относительной погрешности (при $x_{\text{и}} \neq 0$):

$$\delta(x) = \Delta(x)/|x_{\text{и}}|. \quad (3.42)$$

Так как значение $x_{\text{и}}$ неизвестно, то непосредственное вычисление величин $\Delta(x)$ и $\delta(x)$ невозможно, поэтому вводятся понятия оценок (предельного значения) погрешностей. $\Delta_{\text{п}}(x)$ и $\delta_{\text{п}}(x)$ — это известные величины, которые называют также верхними границами (или просто границами) соответственно абсолютной и относительной погрешностей.

При работе с приближенными числами возникает необходимость по известным погрешностям чисел оценивать погрешность результата действий над этими числами. Для решения этой (или обратной) задачи необходимо, во-первых, правильно записывать и округлять приближенные числа и, во-вторых, уметь правильно проводить математические действия над этими числами, т.е. проводить приближенные вычисления. Рассмотрим некоторые правила указанных действий.

3.6.1. Правила записи и округление приближенных чисел

Прежде всего рассмотрим понятие значащих и верных цифр числа. Значащими цифрами числа x называются все цифры в его записи, начиная с первой ненулевой слева.

Примеры:

- 1) $x = 0,03401$, значащие цифры — 3, 4, 0, 1;
- 2) $x = 0,25$, значащие цифры — 2, 5;
- 3) $x = 0,03030$, значащие цифры — 3, 0, 3, 0.

Заметим, что не следует при записи приближенных чисел отбрасывать последние значащие нули.

Значащую цифру приближенного числа называют верной, если абсолютная погрешность этого числа не превосходит единицы разряда, соответствующего этой цифре. Остальные цифры называют сомнительными. Иначе говоря, количество верных знаков приближенного числа отсчитывается от первой значащей цифры числа до первой значащей цифры его абсолютной погрешности.

Количество верных значащих цифр числа тесно связано с величиной его относительной погрешности.

Утверждается, что если приближенное число x имеет N верных значащих цифр, то предельная относительная погрешность этого числа может быть принята равной дроби, числитель которой единица, а знаменатель есть целое число, написанное при помощи всех верных значащих цифр данного числа. При использовании этого правила рекомендуется в знаменателе оставлять только первую значащую цифру, заменяя остальные нулями.

Пример: $x = 2,62$, $\delta_n(x) = 1/262$ или $\delta_n(x) = 1/200 = 0,005 = 0,5 \%$.

Если приближенное число x приводится в качестве результата без указания величины погрешности, то это значит, что все его значащие цифры являются верными.

Абсолютную погрешность числа принято считать равной пяти единицам разряда, следующего справа за последней цифрой.

Примеры:

1) $x = 0,03401$, $\Delta(x) = 0,000005$;

2) $x = 35,8100$, $\Delta(x) = 0,00005$.

Исходя из равенства (3.41), число x_n можно записывать в виде

$$x_n = x \pm \Delta(x).$$

В этом случае числа x и $\Delta(x)$, как правило, указывают с одинаковым числом цифр после десятичной запятой.

Пример: $x = 2,355$, $\Delta(x) = 0,001832$, тогда $x_n = 2,355 \pm 0,002$.

Операция округления числа в общем случае сводится к отбрасыванию части цифр некоторого числа и замене их, если это нужно для сокращения разрядности, нулями. Таким образом, округлить число — значит заменить его числом с меньшим количеством значащих цифр. Возникающая при таком округлении погрешность называется погрешностью округления.

При округлении полученного результата измерения и рассчитанного значения погрешности принято руководствоваться следующими правилами.

1. Числовое значение результата измерения должно ограничиваться тем же десятичным знаком, которым заканчивается округление абсолютной погрешности.

2. В записи погрешности результата обычно ограничиваются одной значащей цифрой, если первая из них ≥ 3 , и двумя значащими цифрами, если первая из них равна цифре 1 или цифре 2. Очень редко при особо точных измерениях погрешность записывается тремя цифрами.

3. При округлении числа до n значащих цифр, отбрасываются все цифры, стоящие справа от n -й значащей цифры. При этом:

- если первая слева из отброшенных цифр больше или равна 5 и последующие цифры не нули, то последнюю оставшуюся цифру увеличивают на единицу;
- если первая слева из отброшенных цифр меньше 5, то остальные цифры числа не изменяются;
- если первая слева из отброшенных цифр равна 5 с последующими нулями, то последнюю оставшуюся цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная.

4. В промежуточных расчетах результаты действий могут записываться с одной или двумя сомнительными цифрами (мнимыми знаками). Округление производится лишь в окончательном ответе.

3.6.2. Некоторые математические действия с приближенными числами

При сложении и вычитании приближенных чисел следует сохранить столько десятичных знаков, сколько их в приближенном числе с наименьшим числом десятичных знаков.

Пример: $3,5481 + 28,340 + 326,5 + 65,804 \approx 424,2$.

Абсолютная погрешность алгебраической суммы Δ не превосходит суммы абсолютных погрешностей слагаемых.

Для алгебраической суммы двух слагаемых

$$\Delta(a + b) \leq \Delta(a) + \Delta(b). \quad (3.43)$$

Исходя из неравенства (3.43), можно записать

$$\Delta(a \pm b) \approx \Delta(a) + \Delta(b). \quad (3.44)$$

Если все n слагаемых имеют одну и ту же погрешность Δ' , то абсолютная погрешность их суммы оценивается формулой

$$\Delta = n\Delta'.$$

При большом числе слагаемых это дает завышенную оценку, поэтому в таком случае рекомендуется пользоваться формулой [1]

$$\Delta = \sqrt{3n}\Delta'.$$

Если складываются числа, имеющие разные абсолютные погрешности, то эти числа рекомендуется предварительно соответствующим образом округлять.

Пример. Найти сумму $a + b + c$, если $a = 31,42$; $\Delta(a) = 0,005$; $b = 512,4578$; $\Delta(b) = 0,00005$; $c = 7,51844$; $\Delta(c) = 0,000005$.

Решение. Сначала округлим b и c , оставив три десятичных знака после запятой (один запасной): $b = 512,458$; $c = 7,518$. Тогда

$$a + b + c = 31,42 + 512,458 + 7,518 \approx 551,40; \quad \Delta = \Delta(a) = 0,005.$$

При оценке относительной погрешности суммы и разности можно пользоваться следующими формулами:

$$\delta(a + b) = \delta_{\max}, \quad (3.45)$$

$$\delta(a - b) = \nu \delta_{\max}, \quad (3.46)$$

где $\delta_{\max} = \max\{\delta(a), \delta(b)\}$, $\nu = |a + b|/|a - b|$.

Равенство (3.45) означает, что при суммировании чисел одного знака не происходит потерь точности.

При вычитании чисел одного знака (3.46) граница относительной ошибки возрастает и возможна существенная потеря точности, если a и b близки настолько, что $\nu \gg 1$. Поэтому следует избегать вычитания близких чисел одного знака, а если такое вычитание неизбежно, то следует проводить вычисление с повышенной точностью, учитывая ее потерю примерно в ν раз.

При умножении и делении приближенных чисел в результате остается столько значащих цифр, сколько их имеет приближенное исходное число с наименьшим количеством значащих цифр. Относительная погрешность результата определяется как сумма относительных погрешностей исходных чисел.

Пример. Найти $\delta(ab)$, если $a = 7,23$, $b = 123,6$.

Решение.

$$\delta(a) = 1/723 < 1/700 < 0,0015;$$

$$\delta(b) = 1/1236 < 1/1000 < 0,001;$$

$$\delta(ab) = \delta(a) + \delta(b) = 0,0025;$$

$$\Delta(ab) = ab\delta(ab) = 894 \cdot 0,0025 \approx 2,3;$$

$$ab = 894 \pm 2,3.$$

При возведении в степень с натуральным показателем следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет возводимое в степень приближенное число.

При извлечении корня n -й степени в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное число.

При обработке результатов измерений в ряде случаев возникает необходимость определять значение и погрешность функции y при известных значениях и погрешностях аргументов $x_1, x_2, \dots, x_n$ (например, см. разд. 3.5).

В математике доказывается, что если функция одного аргумента $y = f(x)$ дифференцируема, то предельную абсолютную погрешность функции можно оценить по формуле

$$\Delta(y) = |f'(x)|\Delta(x),$$

а относительная погрешность функции равна абсолютной погрешности ее натурального логарифма:

$$\delta(y) = \Delta(\ln y).$$

Пример. Найти относительную погрешность функции $y = x^m$, где m — действительное число.

Решение.

$$\begin{aligned} \ln y &= m \ln x; \quad \delta(y) = \Delta(\ln y) = \Delta(m \ln x) = \\ &= |m| |(\ln x)'| \Delta(x) = |m| \Delta(x)/x = |m| \delta(x). \end{aligned}$$

Таким образом, $\delta(y) = |m| \delta(x)$.

Пример. $y = a^x$.

$$\ln y = x \ln a; \quad \Delta(\ln y) = \Delta(x) |\ln a|,$$

т.е. $\delta(y) = |\ln a| \Delta(x)$.

Для частного случая, когда $y = e^x$, $\delta(y) = \Delta(x)$.

Для функции многих переменных $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$\begin{aligned} \Delta(y) &= \sum_{i=1}^n \left| \frac{df}{dx_i} \right| \Delta(x_i); \\ \delta(y) &= \sum_{i=1}^n \left| \frac{df}{dx_i} \ln y \right| \Delta(x_i). \end{aligned}$$

Пример. Вычислить значение функции $z = \frac{1}{3}x^2y^3$, если $x = 3,6(\pm 0,05)$, $y = 3,15(\pm 0,005)$.

Решение:

$$\begin{aligned} \Delta_z &= \left| \frac{dz}{dx} \right| \Delta(x) + \left| \frac{dz}{dy} \right| \Delta(y); \\ \frac{dz}{dx} &= \frac{2}{3}xy^3 = \frac{2}{3}3,6 \cdot (3,15)^3 = 75,0; \\ \frac{dz}{dy} &= x^2y^2 = 128,6; \\ \Delta_z &= 75,0 \cdot 0,05 + 128,6 \cdot 0,005 = 3,75 + 0,643 \approx 4,4; \\ z &= \frac{1}{3}x^2y^3 = 135(\pm 4,4). \end{aligned}$$

Контрольные вопросы

1. Как обнаружить грубую погрешность при многократных измерениях?
2. Для чего используют поправочный коэффициент и поправочный множитель?
3. Что понимается под исправленным результатом измерений?
4. Назовите способы обнаружения систематических погрешностей в процессе измерения?
5. Чем отличаются понятия: «границы неисключенной систематической погрешности» и «доверительные границы неисключенной систематической погрешности»?
5. Какой показатель используется для оценивания суммарной неисключенной систематической погрешности результата измерения?

6. Как определить доверительные границы случайной погрешности результата измерения, если известны средние квадратические отклонения случайных составляющих погрешности?

7. Поясните, в чем состоит отличие двух методов определения инструментальной составляющей погрешности измерений по нормируемым метрологическим характеристикам СИ?

8. Какую информацию содержат следующие обозначения классов точности СИ: 1,5; (2,5); 0,02/0,01?

9. Что характеризует среднее квадратическое отклонение ряда измерений $\hat{\sigma}$ и СКО среднего значения при многократных измерениях?

10. По какой форме представляется результат многократного измерения?

11. В чем суть метода линеаризации при определении погрешностей косвенных измерений?

Глава 4

Организационно-правовые основы обеспечения единства измерений

Материал данного раздела основан на концепции проекта нового Федерального закона «Об обеспечении единства измерений», утвержденной заместителем Председателя Правительства РФ, и проекте самого Закона, рассмотренного на заседании рабочей группы.

В связи с принятием Закона «О техническом регулировании», в соответствии с которым обеспечение единства измерений в стране попадает в сферу технического регулирования, в новый Закон «Об обеспечении единства измерений» вошли положения, касающиеся правовой регламентации вопросов обеспечения единства измерений техническими регламентами.

4.1. Законодательство РФ об обеспечении единства измерений

Законодательство РФ об обеспечении единства измерений состоит из Конституции РФ, Федерального закона РФ «Об обеспечении единства измерений», принимаемых в соответствии с ним федеральных законов и иных нормативно-правовых актов России. При этом положения федеральных законов и иных нормативных правовых актов России по вопросам обеспечения единства измерений могут применяться только в части, не противоречащей Закону «Об обеспечении единства измерений».

В статье 71 Конституции РФ зафиксировано, что в ведении РФ находятся стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени. Тем самым за основными вопросами метрологии закреплено централизованное государственное руководство.

Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в России в целях:

- обеспечения доверия к результатам измерений, защиты прав и законных интересов граждан, индивидуальных предпринимателей, юридических лиц и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений;
- обеспечения потребностей государства и общества в получении объективных, достоверных и сопоставимых результатов измерений, используемых при принятии решений для защиты жизни и здоровья

граждан, охраны окружающей среды, обеспечения обороны, безопасности государства, в том числе экономической, рационального использования природных ресурсов;

- создания условий для расширения внешнеэкономических связей России, признания результатов измерений иностранными государствами и повышения конкурентоспособности продукции, работ и услуг.

Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» регулирует отношения, возникающие при разработке, принятии и исполнении как обязательных требований, так и требований на добровольной основе к следующим позициям: проведению измерений; результатам измерений; единицам величин; эталонам единиц величин; средствам измерений; методам и методикам выполнения измерений; оценке соответствия требованиям; осуществлении деятельности в области обеспечения единства измерений. Этот Закон определяет также права, обязанности и ответственность участников, попадающих в сферу регулирования Законом.

Сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется на измерения, к результатам которых установлены обязательные требования и которые проводятся при:

- осуществлении деятельности в области здравоохранения;
- осуществлении ветеринарной деятельности;
- проведении работ по мониторингу и представлении информации о состоянии и загрязнении природной окружающей среды;
- осуществлении деятельности по обеспечению безопасности при чрезвычайных ситуациях;
- выполнении работ по обеспечению безопасности труда;
- оптовой и розничной торговле;
- осуществлении деятельности по добыче полезных ископаемых;
- выполнении государственных учетных операций;
- выполнении почтовых операций и операций по учету объемов оказанных услуг связи и объемов трафика;
- осуществлении деятельности в области обороны и безопасности государства;
- осуществлении геодезической и картографической деятельности;
- осуществлении деятельности в области гидрометеорологии;
- проведении банковских операций, налоговых и таможенных операций;
- выполнении работ по оценке соответствия требованиям технических регламентов;
- регистрации национальных и международных спортивных рекордов;
- проведении измерений по поручению органов судов, прокуратуры, государственных органов исполнительной власти.

Обязательные требования к результатам измерений устанавливаются законодательством РФ о техническом регулировании, иными федеральными законами, нормативными правовыми актами Президента и правительства РФ.

Вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений могут применяться полностью или частично обязательные требования к результатам измерений, а также требования к результатам измерений международных, национальных стандартов, стандартов организаций и (или) требования договоров (контрактов).

Обеспечение единства измерений осуществляется в соответствии с следующими принципами:

- применения на территории России и на находящихся под юрисдикцией России территориях установленных единиц величин;
- обеспечения прослеживаемости передачи размера единиц величин от государственного первичного эталона единиц величин к другим эталонам единиц величин и СИ;
- применения единой системы и правил обеспечения единства измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений;
- соответствия деятельности по обеспечению единства измерений уровню развития национальной экономики, развития материально-технической базы, а также уровню научно-технического развития;
- недопустимости ограничения конкуренции при проведении испытаний, поверке, калибровке СИ, а также аттестации методик выполнения измерений;
- недопустимости внебюджетного финансирования государственного метрологического надзора;
- гармонизации обязательных требований по обеспечению единства измерений и форм оценки соответствия данным требованиям с международными документами по метрологии;
- открытости и доступности информации в области обеспечения единства измерений, за исключением случаев, предусмотренных законодательством РФ.

В целях обеспечения единства измерений при осуществлении международного экономического и научно-технического сотрудничества Российская Федерация взаимодействует с международными и региональными организациями по метрологии.

Признание в России результатов оценки соответствия СИ и аккредитации на проведение работ в области обеспечения единства измерений, выполняемых иностранными юридическими лицами, а также зарубежных методик выполнения измерений, осуществляется на основании межгосударственных договоров.

Если международным договором России в сфере обеспечения единства измерений установлены иные правила, чем те, которые предусмотрены Законом «Об обеспечении единства измерений», применяются правила международного договора, а в случаях, если из международного договора следует, что для его применения требуется издание внутригосударственного акта, применяются правила международного договора и принятое на его основе законодательство РФ.

4.2. Национальная система обеспечения единства измерений

Национальная система обеспечения единства измерений (НСОЕИ) — это совокупность правил выполнения работ по обеспечению единства измерений, ее участников и правил функционирования системы обеспечения единства измерений в целом.

Структура НСОЕИ и ее участники представлены на рис. 4.1.

Федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений (ФОИВ по НПР), решает следующие задачи:

- разрабатывает государственную политику и осуществляет нормативно-правовое регулирование в области обеспечения единства измерений;
- организует разработку и реализацию программ развития средств и методов обеспечения единства измерений;
- координирует проведение работ по обеспечению единства измерений, в том числе между федеральными органами исполнительной власти;
- организует и осуществляет взаимодействие с органами государственной власти иностранных государств и международными (региональными) организациями по вопросам обеспечения единства измерений;
- участвует в деятельности международных (региональных) организаций по вопросам обеспечения единства измерений, является официальным представителем России в международных (региональных) организациях.

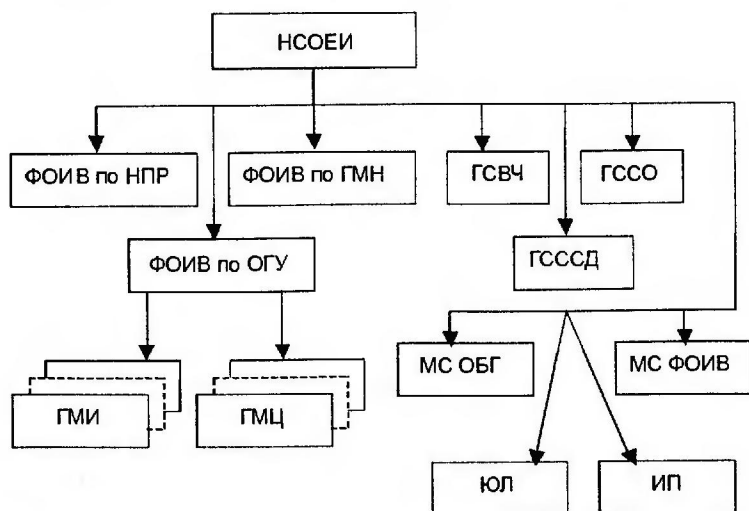


Рис. 4.1. Структура национальной системы обеспечения единства измерений

При ФОИВ по НПР создается совет, формируемый из представителей федеральных органов исполнительной власти, научных организаций, предпринимателей и общественных объединений. Совет создается для рассмотрения организационных, научно-методических и практических вопросов в области обеспечения единства измерений. Он действует в соответствии с положением о совете, утвержденным федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по оказанию государственных услуг в сфере метрологии (ФОИВ по ОГУ) осуществляет:

- организацию ведения государственных реестров и представление сведений из этих реестров;
- обеспечение проведения международных сличений государственных первичных эталонов единиц величин;
- организацию и обеспечение проведения обязательной метрологической экспертизы;
- обеспечение создания единой информационной системы и ведение Федерального информационного фонда в области обеспечения единства измерений и представление информации, содержащейся в них;
- выдачу заключений об отнесении устройств к СИ;
- руководство подведомственными организациями.

В непосредственном подчинении ФОИВ по ОГУ находятся государственные метрологические институты и государственные метрологические центры.

Государственные метрологические институты (ГМИ) выполняют следующие функции:

- проводят фундаментальные и научно-прикладные исследования в области обеспечения единства измерений;
- участвуют в разработке проектов нормативных правовых актов в области обеспечения единства измерений;
- разрабатывают проекты национальных стандартов в области обеспечения единства измерений;
- осуществляют создание, разработку, хранение и применение государственных первичных эталонов единиц величин, находящихся в федеральной собственности;
- проводят сличение государственных первичных эталонов единиц величин, находящихся в федеральной собственности, а также поверку вторичных эталонов и других рабочих эталонов, находящихся в федеральной собственности;
- ведут государственные реестры в области обеспечения единства измерений и представляют сведения из этих реестров;
- проводят обязательную метрологическую экспертизу.

ГМИ имеют определенную специализацию и расположены в различных регионах России.

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС), Москва, является центром Государственных эталонов в области измерения средних давлений и параметров качества обработанных поверхностей. В институте ведется разработка методических материалов по обеспечению единства измерений, а также положений о метрологической службе государственных органов управления и юридических лиц.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (п. Менделеево Московской области) возглавляет ГСВЧ и специализируется на измерении времени и частоты, радиотехнических, акустических и гидродинамических измерениях, измерениях ионизирующих излучений, высоких давлений, температур и др. Во ВНИИФТРИ хранятся около 30 государственных эталонов.

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ), Санкт-Петербург, является основным хранителем государственных эталонов в России (более 50 эталонов). ВНИИМ специализируется на измерении масс, длин, углов, малых давлений, электрических и магнитных величин и др.

Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии (ВНИИР), г. Казань. Специализация — измерение расхода, вместимости жидкостей и газов, свойств и состава нефтепродуктов.

Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ), г. Новосибирск. Специализация — измерение параметров электрических цепей, электромагнитных характеристик материалов на высоких и сверхвысоких частотах и др.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических измерений (ВНИИФТИ), г. Хабаровск. Специализация — неразрушающий контроль качества материалов и изделий.

Восточно-сибирский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВСНИИФТРИ), г. Иркутск. Входит в ВНИИФТРИ и является второй эталонной базой ГСВЧ.

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), Москва. Специализация — оптические, оптико-физические, лазерные, медицинские и другие измерения.

Государственные метрологические центры (ГМЦ) осуществляют проверку исходных эталонов юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, аккредитованных на проведение поверки СИ, а также отдельных видов СИ, утвержденных Правительством РФ.

Федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по государственному метрологическому надзору в сфере метрологии (ФОИВ по ГМН) при государственном регулировании обеспечения единства измерений осуществляет надзор за:

- применением установленных единиц величин;

- соблюдением установленного порядка разработки, утверждения, хранения, применения, продажи и передачи государственных первичных эталонов единиц величин;
- применением и состоянием СИ, соблюдением требований технических регламентов к СИ и к их эксплуатации;
- наличием и применением аттестованных методик выполнения измерений;
- количеством фасованного товара в упаковках при их расфасовке и продаже.

Государственным метрологическим надзором (ГМН) занимаются также другие уполномоченные Правительством РФ органы исполнительной власти, осуществляющие функции по государственному контролю (надзору) в установленной сфере деятельности (Госторгинспекция, Санэпиднадзор и др.).

Порядок проведения ГМН, взаимодействия федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих государственный метрологический надзор, и распределение полномочий между ними устанавливает Правительство РФ.

Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по обеспечению единства измерений времени, частоты и определения параметров вращения Земли. ГСВЧ возглавляет Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ).

Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО) осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по разработке и внедрению стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов в целях обеспечения единства измерений на основе их применения. ГССО возглавляет Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ), г. Екатеринбург.

Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД) осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по разработке и внедрению стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов в науке и технике в целях обеспечения единства измерений на основе их применения. ГСССД возглавляет Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ (ВНИЦСМВ), Москва.

Метрологические службы федеральных органов исполнительной власти (МС ФОИВ). Метрологические службы в федеральных органах исполнительной власти могут создаваться по мере необходимости в соответствии с решением Правительства РФ. На них возлагаются следующие функции:

- разработка требований к результатам измерений в установленной сфере деятельности совместно с федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг в сфере метрологии;
- определение основных направлений и разработки программ по метрологическому обеспечению в установленной сфере деятельности;
- проведение анализа состояния метрологического обеспечения в установленной сфере деятельности;
- координация и организация работы по выполнению обязательных требований в области обеспечения единства измерений в установленной сфере деятельности;
- проведение обязательной метрологической экспертизы в установленной сфере деятельности;
- метрологический надзор в подведомственных организациях.

Положения о метрологических службах утверждаются руководителями федеральных органов исполнительной власти по согласованию с ФОИВ по НПР. Надзор за деятельностью МС ФОИВ осуществляется ФОИВ по ГМН в порядке, утвержденном Правительством РФ.

Метрологические службы в сфере обороны и безопасности государства (МС ОБГ). В области обороны и безопасности государства создание метрологических служб, обеспечивающих единство измерений, является обязательным. Положения о метрологических службах в области обороны и безопасности государства утверждаются руководителями соответствующих федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих функции по нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Координацию деятельности по обеспечению единства измерений в области обороны и безопасности государства осуществляет федеральный орган исполнительной власти, выполняющий функции по выработке и реализации государственной политики, нормативно-правовому регулированию в области обороны.

Особенности обеспечения единства измерений в области обороны и безопасности государства устанавливаются Правительством РФ.

Основные функции метрологической службы в сфере обороны:

- разработка и применение метрологических правил, положений, норм;
- осуществление метрологического контроля и надзора;
- проведение метрологической экспертизы;
- военно-метрологическое сопровождение разработки, производства и испытаний военной техники;
- обеспечение развития СИ военного назначения;
- проведение военно-научных исследований, НИР и ОКР в области метрологического обеспечения обороны;
- подготовка и повышение квалификации метрологов.

В настоящее время метрологическая служба Вооруженных Сил РФ оснащена достаточным количеством мобильных военных эталонов. В необходимых случаях некоторые военные эталоны могут быть использованы как государственные.

В воинских частях (учреждениях) контроль и надзор за метрологическим обеспечением осуществляют штатные (или внештатные) начальники метрологических служб.

Юридические лица (ЮЛ) и индивидуальные предприниматели (ИП), осуществляющие деятельность в области обеспечения единства измерений в сфере государственного регулирования, могут быть аккредитованы на выполнение следующих работ:

- испытания СИ в целях утверждения их типа;
- аттестация стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов в целях утверждения их типа;
- подтверждение соответствия СИ;
- поверка СИ;
- аттестация методик выполнения измерений.

Аккредитация ЮЛ и ИП, выполняющих работы по обеспечению единства измерений, осуществляется на основе следующих принципов: добровольности; открытости и доступности правил аккредитации; компетенции и независимости органов, осуществляющих аккредитацию; недопустимости ограничения конкуренции и создания препятствий пользованию услугами аккредитованных юридических лиц и индивидуальных предпринимателей; обеспечения равных условий лицам, претендующим на получение аккредитации; недопустимости совмещения одним органом полномочий на аккредитацию и проведение испытаний СИ в целях утверждения их типа, подтверждение соответствия СИ, поверку СИ, аттестацию стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов в целях утверждения их типа и аттестацию методик выполнения измерений; недопустимости установления пределов действия документов об аккредитации на отдельных территориях.

Аккредитация ЮЛ и ИП на выполнения работ по подтверждению соответствия СИ проводится в порядке, установленном законодательством РФ о техническом регулировании (см. гл. 17).

Аккредитацию ЮЛ и ИП на выполнение других из перечисленных выше работ проводит ФОИВ по ГМН в порядке установленном Правительством РФ.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, выполняющие работы по обеспечению единства измерений вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут быть аккредитованы в добровольном порядке на выполнение работ по калибровке СИ и метрологической экспертизе.

Юридические лица, объединения юридических лиц могут в добровольном порядке создавать метрологические службы для выполнения работ по обеспечению единства измерений. Права и обязанности метрологических служб определяются их руководителями.

В сфере государственного регулирования обеспечение единства измерений ответственность за организацию работ по обеспечению единства измерений и за нарушение законодательства РФ об обеспечении единства измерений несут руководители юридических лиц и индивидуальные предприниматели.

4.3. Основные виды метрологической деятельности по обеспечению единства измерений

Под единством измерений понимается такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности (неопределенности) измерений не выходят за установленные границы.

Действующая в стране Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) как организационная, научно-техническая и нормативно-правовая система предусматривает большое количество мероприятий различного характера, направленных на обеспечение и поддержание необходимого уровня единства измерений. Рассмотрим некоторые из них.

Оценка соответствия средств измерений. При проведении измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, на территории России должны применяться СИ, соответствующие требованиям технических регламентов и прошедшие оценку соответствия.

Требования технических регламентов к СИ устанавливают с учетом требований к результатам измерений. При этом в технических регламентах могут содержаться требования не только к СИ в целом, а и к их составным частям, в том числе к программному обеспечению. Технические регламенты могут содержать правила оценки соответствия, предельные сроки оценки соответствия, требования к терминологии, маркировке СИ и правилам их нанесения, а также требования по обеспечению ограниченного доступа к узлам регулирования внутренних элементов конструкции СИ и защите измерительной информации.

Возможные формы оценки соответствия СИ (кроме стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов — СОСЦВМ) представлены в табл. 4.1.

Оценка соответствия СОСЦВМ в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений проводится в двух формах:

- до выпуска СОСЦВМ в обращение — в форме утверждения типа;
- при выпуске СОСЦВМ в обращение — в форме подтверждения соответствия.

Утверждение типа средств измерений (кроме СОСЦВМ) осуществляется на основании положительных результатов испытаний. Утверждение типа СОСЦВМ осуществляется на основании положительных результатов аттестации.

Таблица 4.1

Формы оценки соответствия средств измерений

Период жизненного цикла СИ	Форма оценки соответствия
До выпуска СИ в обращение (при разработке, при ввозе на таможенную территорию России)	Утверждение типа
При выпуске СИ в обращение (при выпуске из производства, при ввозе на таможенную территорию России)	Подтверждение соответствия и первичная поверка
При выпуске СИ из ремонта	Поверка
При обращении на рынке, в том числе эксплуатации СИ	Поверка с соблюдением установленного интервала между поверками и государственный метрологический надзор

Испытания СИ (кроме СОССВМ) или аттестацию СОССВМ в целях утверждения их типа проводят юридические лица и индивидуальные предприниматели, аккредитованные в установленном порядке на проведение данных работ.

Порядок проведения испытаний СИ (кроме СОССВМ) и порядок аттестации СОССВМ утверждается ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

Утверждение типа СИ, в том числе СОССВМ, проводит ФОИВ по ГМН в сфере метрологии в порядке, утвержденном ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

При утверждении типа СИ (кроме СОССВМ) устанавливается интервал между поверками и методика поверки. В течение срока действия документа об утверждении типа СИ интервал между поверками может быть изменен ФОИВ по ГМН в сфере метрологии, а порядок установления и изменения интервала между поверками СИ утверждается ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

Решение об утверждении типа СИ, в том числе СОССВМ, удостоверяется документом об утверждении типа. Срок действия документа об утверждении типа определяется по результатам проведения испытаний СИ (кроме СОССВМ) или аттестации СОССВМ в порядке, установленном ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

На каждый экземпляр СИ утвержденного типа, а также на сопроводительные документы наносится знак утверждения типа. Сведения об утвержденных типах СИ вносятся в Государственный реестр средств измерений. Сведения об утвержденных типах СОССВМ вносятся в Государственный реестр СОССВМ. Указанные Государственные реестры ведет ФОИВ по ОГУ в сфере метрологии, а порядок ведения реестров и представления сведений определяет ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

Аттестация методик выполнения измерений. Методика выполнения измерений — это совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результата измерений с установленной погрешностью.

Требования к проведению измерений с применением аттестованных методик, а также требования к методикам выполнения измерений устанавливаются законодательством РФ о техническом регулировании.

Порядок аттестации методик выполнения измерений утверждается ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

Аттестация методик выполнения измерений проводится:

- на соответствие установленным требованиям к результатам измерений;
- собственно к методикам выполнения измерений.

В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений аттестацию методик выполнения измерений проводят юридические лица и индивидуальные предприниматели, аккредитованные в установленном порядке на выполнение работ по аттестации методик выполнения измерений. Результаты аттестации удостоверяются документом об аттестации методики выполнения измерений. Сведения об аттестованных методиках выполнения измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели представляют в ФОИВ по ОГУ в сфере метрологии для внесения в Государственный реестр аттестованных методик выполнения измерений. Порядок ведения реестра и представления сведений, содержащихся в реестре, определяет ФОИВ по НПР.

Вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений в добровольном порядке могут применяться аттестованные методики выполнения измерений, стандартизованные методики выполнения измерений, методики выполнения измерений, сертифицированные в добровольном порядке, а также разработанные юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями. В качестве основы для разработки методик выполнения измерений юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями полностью или частично могут использоваться международные и национальные стандарты, а также стандарты организаций. Добровольная сертификация методик выполнения измерений проводится в соответствии с законодательством РФ о техническом регулировании.

Поверка и калибровка средств измерений.

Поверка средств измерений — это совокупность операций, выполняемых с целью подтверждения соответствия действительных значений метрологических характеристик СИ установленным обязательным требованиям по обеспечению единства измерений.

Калибровка СИ — это совокупность операций, выполняемых с целью определения действительных значений метрологических характеристик СИ.

Поверку вторичных эталонов, исходных эталонов юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, аккредитованных на проведение поверки СИ, а также отдельных видов СИ, имеющих наиболее важное значение для обеспечения единства измерений в целях защиты интересов

граждан, обеспечения безопасности страны и ее экономических интересов, организует федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по оказанию государственных услуг в сфере метрологии. Перечень таких видов СИ устанавливается Правительством РФ.

Поверку остальных СИ проводят юридические лица и индивидуальные предприниматели, аккредитованные в установленном порядке на проведение поверки СИ.

Порядок проведения поверки утверждается ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

Результаты поверки удостоверяются знаком поверки и (или) свидетельством о поверке. В случаях, когда СИ не соответствует установленным требованиям, на него наносится знак непригодности.

Лица, осуществляющие поверку СИ, подлежат аттестации в соответствии с порядком, утвержденным ФОИВ по НПР в области обеспечения единства измерений.

Аттестацию лиц, осуществляющих поверку СИ, проводит ФОИВ по ГМН в сфере метрологии.

Вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений в добровольном порядке могут применяться как СИ утвержденных типов, так и СИ, сертифицированные в системах добровольной сертификации.

Вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений могут применяться полностью или частично требования технических регламентов к СИ, а также требования к СИ международных, национальных стандартов, стандартов организаций и (или) требования договоров (контрактов).

В процессе эксплуатации СИ могут в добровольном порядке подлежать как поверке, так и калибровке.

В качестве основы для разработки порядка выполнения калибровочных работ полностью или частично может использоваться порядок, установленный международными, национальными стандартами, стандартами организаций.

Калибровка СИ проводится с использованием эталонов единиц величин, требования к которым установлены Законом «Об обеспечении единства измерений».

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, выполняющие калибровочные работы, в добровольном порядке могут быть аккредитованы.

Поверку принято разделять на первичную, периодическую, внеочередную, инспекционную и экспертную.

Первичная поверка проводится при выпуске СИ из производства и ремонта. Первичной поверке подлежат также СИ при ввозе на таможенную территорию России и предназначенные для обращения на данной территории. Первичной поверке подлежит, как правило, каждый экземпляр СИ. Допускается и выборочная поверка.

Периодическая поверка — это поверка СИ, проводимая при их эксплуатации и хранении через определенные промежутки времени, называемые межповерочными интервалами.

Продолжительность межповерочных интервалов устанавливается такой, чтобы гарантировать метрологическую исправность СИ в период между поверками. Межповерочный интервал и методика поверки данного типа СИ устанавливается при утверждении его типа.

Инспекционная поверка обычно проводится в процессе государственного метрологического надзора за применением и состоянием СИ, соблюдением требований технических регламентов к СИ и их эксплуатации.

Экспертная поверка СИ проводится в объеме, необходимом для основания заключения экспертизы по метрологическим характеристикам, исправности СИ и пригодности их к применению. Экспертная поверка проводится в следующих случаях: по требованию государственного арбитража, прокуратуры, суда; по письменному заявлению организаций или граждан при возникновении спорных вопросов. По результатам экспертной поверки составляется экспертное заключение.

Организационно-технической основой поверки СИ является правильная организация воспроизведения и передачи размера единицы величин от эталонов рабочим СИ.

Прямая передача размеров единиц физических величин от первичных эталонов рабочим СИ затруднена. Поэтому на практике процедура передачи размеров единиц осуществляется с использованием рабочих эталонов в соответствии с государственными (иерархическими) поверочными схемами. Поверочная схема — это утвержденный в установленном порядке нормативный документ, определяющий соподчиненность различных СИ (включая эталоны), участвующих в передаче размеров единицы, с указанием метода и точности передачи. Государственные поверочные (иерархические) схемы подлежат утверждению в порядке, установленном ФИВ по НПР в области обеспечения единства измерений. Сведения об утвержденных государственных поверочных (иерархических) схемах вносятся в реестр Государственных первичных эталонов единиц величин.

Государственная поверочная схема распространяется на все СИ данной физической величины, имеющиеся в стране. Она оформляется в виде государственного стандарта, который должен включать в себя чертеж поверочной схемы и необходимую текстовую часть.

Вариант государственной схемы передачи информации о размере единицы представлен на рис. 4.2.

При организации локальных поверочных схем используются исходные эталоны, т.е. эталоны юридического лица или индивидуального предпринимателя.

Локальные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам для тех же физических величин, однако

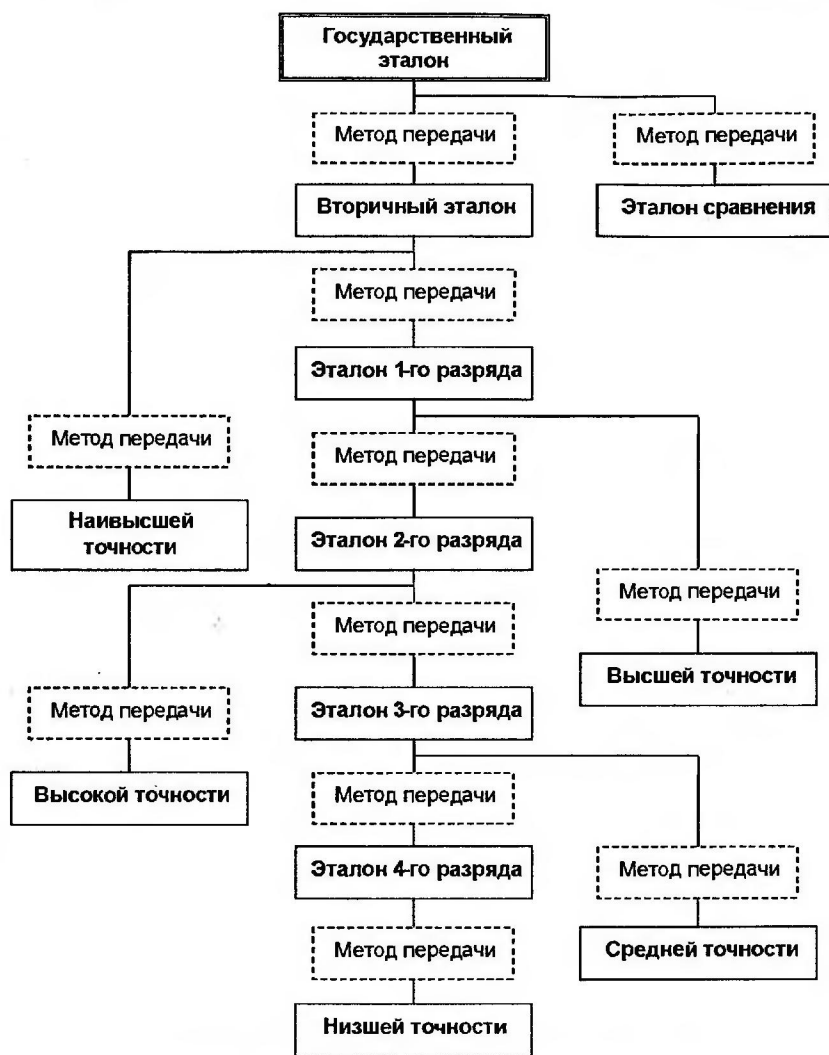


Рис. 4.2. Структура государственной поверочной схемы

они могут быть разработаны и при отсутствии государственной поверочной схемы. Пример компоновки локальной поверочной схемы для СИ времени и частоты показан на рис. 4.3.

Локальные схемы являются составной частью государственной схемы, возглавляемой Государственным эталоном. Многоступенчатая система передачи информации о размере единиц, основанная на централизованном воспроизведении единиц, считается недостаточно эффективной. На каждой ступени передачи информации о размере едини-

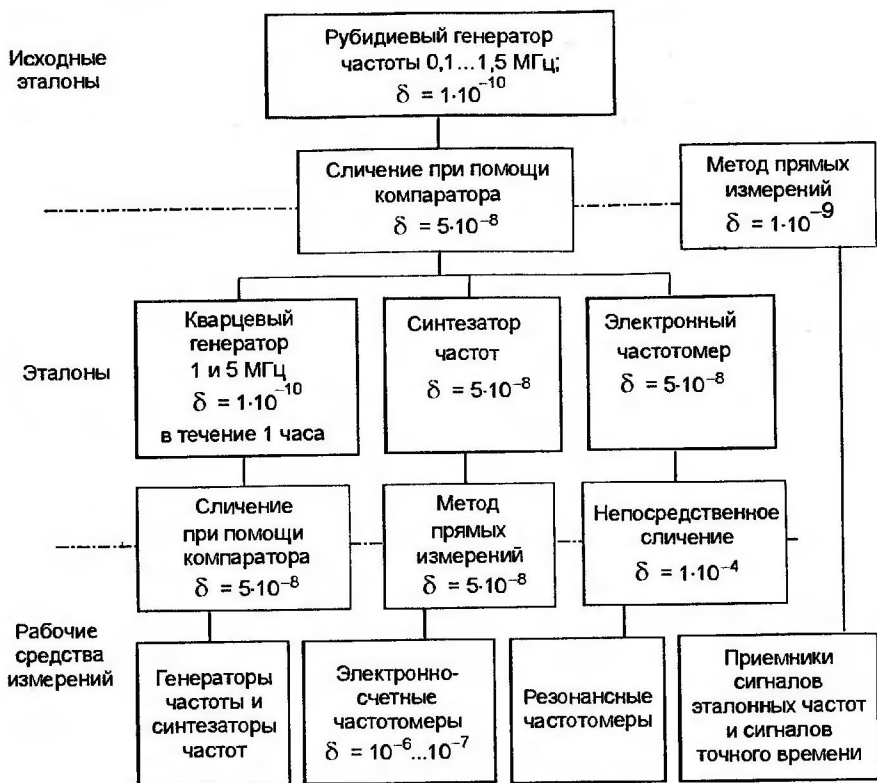


Рис. 4.3. Локальная поверочная схема для средств измерения времени и частоты

цы теряется точность. Перспективным считается децентрализованный способ воспроизведения единиц.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите структуру метрологической службы России.
2. По каким задачам осуществляется взаимодействие между государственной метрологической службой, метрологическими службами государственных органов управления и юридических лиц?
3. Назовите основные виды метрологической деятельности по обеспечению единства измерений.
4. Кто осуществляет Государственный метрологический контроль и надзор?
5. Перечислите основные виды работ проводимых при метрологическом контроле.
6. С какой целью проводится поверка СИ?
7. Какие СИ подлежат поверке, а какие калибровке?
8. Назовите законодательные акты по вопросам метрологии, принятые в Российской Федерации.
9. Чем вызвана необходимость в разработке нового Закона «Об обеспечении единства измерений»?

ЧАСТЬ II

Методы и средства измерения физических величин

Основные элементы электрорадиоизмерительных приборов

5.1. Масштабные измерительные преобразователи

К преобразовательным устройствам, осуществляющим функции масштабного преобразования, принято относить шунты, добавочные резисторы, делители напряжения, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители.

Шунты предназначены для расширения пределов измерения по току и представляют собой калиброванные резисторы (меры). Схема включения шунта к измерительному прибору показана на рис. 5.1.

Сопротивление шунта выбирается таким, чтобы большая часть тока протекала по шунту. Конкретное сопротивление шунта можно определить из равенства

$$I_{\text{пр}} R_{\text{пр}} = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}},$$

откуда

$$R_{\text{ш}} = R_{\text{пр}}(I_{\text{пр}}/I_{\text{ш}}). \quad (5.1)$$

Учитывая, что $I_x = I_{\text{пр}} + I_{\text{ш}}$, можно записать

$$R_{\text{ш}} = R_{\text{пр}} \left(\frac{I_x}{I_{\text{ш}}} - 1 \right) = \frac{R_{\text{пр}}}{I_x/I_{\text{пр}} - 1} = \frac{R_{\text{пр}}}{n - 1}. \quad (5.2)$$

Коэффициент $n = I_x/I_{\text{пр}}$ принято называть коэффициентом шунтирования. Из равенства (5.2) также следует $n = (R_{\text{ш}} + R_{\text{пр}})/R_{\text{ш}}$.

Шунты применяют в основном с магнитоэлектрическими измерительными механизмами в цепях постоянного тока. На переменном токе сопротивление шунта и сопротивление измерительного механизма при изменении частоты измеряемого сигнала изменяются неодинаково, что приводит к дополнительной погрешности.

Конструктивно различают внутренние и наружные шунты. Внутренние шунты применяют обычно в амперметрах для измерения небольших токов (до 30 А). Они располагаются, как правило, внутри корпуса прибора. Наружные (внешние) шунты используют с приборами для измерения больших токов (до 6000 А). В этом случае мощность, рассеиваемая шунтом, не нагревает прибор.

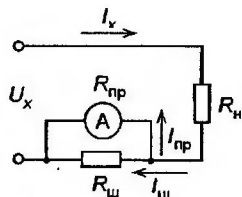


Рис. 5.1. Схема включения шунта

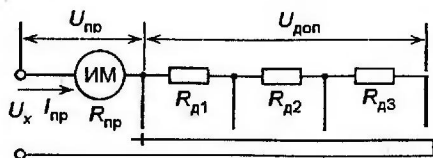


Рис. 5.2. Схема включения добавочного резистора

Основные параметры шунтов регламентируются. По точности различают следующие классы шунтов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Класс точности означает допустимое отклонение сопротивления шунта от его номинального значения, выраженное в процентах.

Добавочные резисторы предназначены для расширения пределов измерения по напряжению электроизмерительных механизмов, т.е. они ограничивают ток в цепи измерительного механизма и позволяют использовать его для измерения больших значений напряжения.

Добавочные резисторы включают последовательно с измерительным механизмом (рис. 5.2).

Расширение пределов измерения прибора за счет добавочного резистора принято оценивать коэффициентом расширения (множителем шкалы)

$$m = U_x / U_{пр}.$$

Сопротивление добавочного резистора $R_{доб}$ можно определить исходя из равенства

$$U_x = U_{пр} + U_{доб} = I_{пр} R_{пр} + I_{пр} R_{доб}.$$

Откуда

$$R_{доб} = U_x / I_{пр} - R_{пр} = (U_x / U_{пр} - 1) R_{пр} = (m - 1) R_{пр}. \quad (5.3)$$

Добавочные резисторы выполняют обычно однопредельными для щитовых приборов и многопредельными для переносных. По точности добавочные резисторы подразделяют на классы: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Класс точности добавочных резисторов определяется отношением абсолютной погрешности значения сопротивления к его номинальному значению:

$$\delta = \pm \frac{\Delta R}{R_{ном}} \cdot 100 \, \%.$$

Делители напряжения предназначены для понижения напряжения в определенное число раз.

Основными показателями делителей напряжения являются коэффициент деления (коэффициент передачи) K_d ; частотный диапазон, в

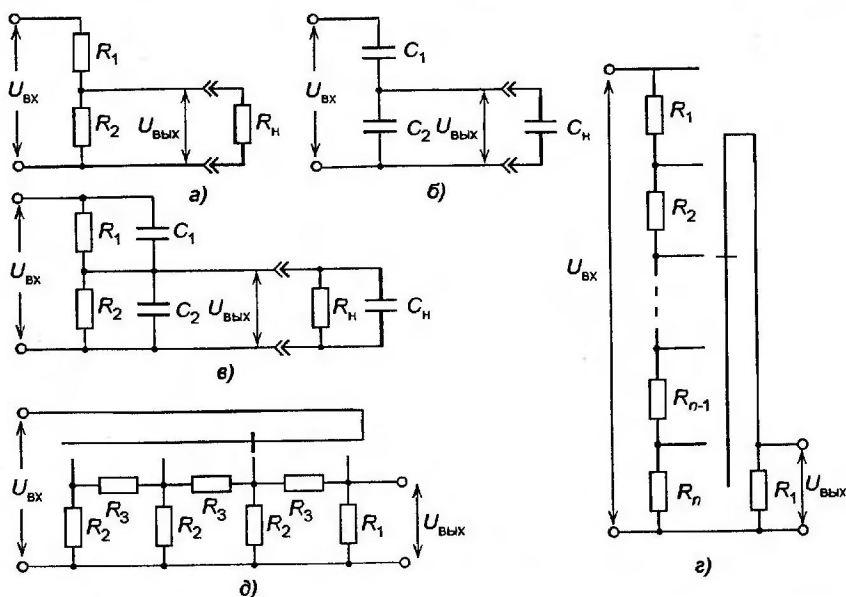


Рис. 5.3. Схемы делителей напряжения: а — простого резистивного; б — емкостного; в — с корректирующими элементами; г — секционированного; д — ступенчатого

котором сохраняется постоянство K_d ; допустимая мощность рассеивания; погрешность деления. Схемы наиболее распространенных делителей напряжения представлены на рис. 5.3.

Коэффициент деления для простейшего резистивного делителя (рис. 5.3, а) можно записать в виде

$$K_d = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5.4)$$

При относительно невысоком сопротивлении нагрузки коэффициент деления зависит от R_n , и в формуле (5.4) вместо R_2 нужно использовать

$$R'_2 = R_2 R_n / (R_2 + R_n).$$

Коэффициент деления для емкостного делителя (рис. 5.3, б) определяется выражением (5.5) при условии, что $C_2 \ll C_n$. Если же это условие не выполняется, то расчет ведется с учетом C_n :

$$K_d = \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (5.5)$$

Емкостные делители используют в высокочастотных цепях, так как они обладают свойствами неизменности коэффициента деления в диапазоне до сотен мегагерц.

Элементы, входящие в делители (резисторы, конденсаторы), за счет паразитных связей реактивного характера приводят к неравномерности коэффициента передачи в рабочей полосе частот. Уменьшить эти неравномерности позволяют делители, собранные по схеме, представленной на рис. 5.3,в. Такой делитель напряжения является частотно-независимым. Конденсаторы в данном случае выбираются из условия

$$R_1 C_1 = R_2 C_2. \quad (5.6)$$

На низких частотах емкостное сопротивление делителя X_{C_1} и X_{C_2} много больше сопротивлений R_1 и R_2 , поэтому деление осуществляется в основном делителем, состоящим только из активных резисторов. В области высоких частот $X_{C_{1,2}} \ll R_{1,2}$, и деление осуществляется в основном емкостным делителем. При выполнении условия (5.6) коэффициент деления рассматриваемых делителей широкого диапазона ведется по формуле (5.4).

На низких частотах используют индуктивные делители напряжения. По конструкции они подобны автотрансформатору с ферромагнитным сердечником.

Реально делители напряжений, используемые в измерительных приборах, выполняют по более сложной схеме. Широко используют секционированные (рис. 5.3,г) и ступенчатые (рис. 5.3,д) делители.

Аттенюаторы (ослабители) предназначены для понижения напряжения в требуемое число раз. С помощью аттенюаторов осуществляется нормирование малых уровней сигналов. Как и делители, они характеризуются диапазоном рабочих частот, входным и выходным сопротивлениями, допустимой мощностью рассеивания, погрешностью деления. При работе в диапазоне сверхвысоких частот аттенюаторы дополнительно характеризуются коэффициентом стоячей волны.

Ослабление, вносимое аттенюатором, принято выражать в децибелах:

$$A = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} [\text{дБ}]. \quad (5.7)$$

Входное сопротивление аттенюатора, в отличие от делителя напряжения, в процессе регулировки ослабления не изменяется при постоянном сопротивлении нагрузки.

В зависимости от диапазона частот используют аттенюаторы, выполненные на резисторах, конденсаторах или на основе линий с распределенными постоянными предельного и поглощающего токов.

Резистивные аттенюаторы применяют в диапазоне до нескольких десятков мегагерц. Они выполняются из звеньев, представляющих собой Т- или П-образные четырехполюсники. Число звеньев может меняться с помощью переключателя.

Емкостные аттенюаторы используют на частотах до сотен мегагерц, а выполненные на элементах с распределенными постоянными — в диапазоне сверхвысоких частот.

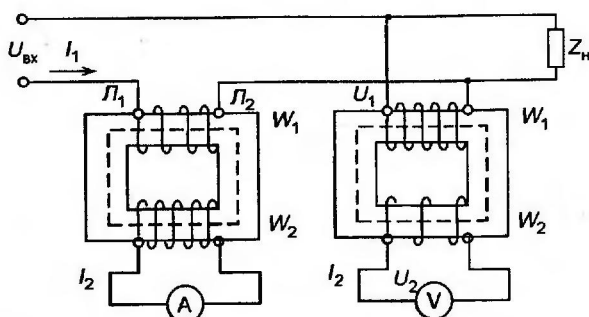


Рис. 5.4. Схема включения измерительных трансформаторов

Измерительные трансформаторы предназначены для преобразования больших напряжений и токов в относительно малые напряжения и токи с целью последующего их использования для измерения типовыми приборами.

Конструктивно измерительный трансформатор представляет собой замкнутый сердечник из магнитомягкого материала, на котором размещены две изолированные обмотки с числом витков W_1 и W_2 . В трансформаторах тока обычно первичный ток I_1 больше вторичного I_2 , поэтому $W_1 < W_2$, а в трансформаторах напряжения первичное напряжение U_1 больше вторичного U_2 , поэтому у них $W_1 > W_2$.

Схема включения измерительных трансформаторов тока и напряжения показана на рис. 5.4.

Значения измеряемых токов I_x и напряжений U_x определяют по показаниям приборов с учетом номинальных значений коэффициентов трансформации по току K_{I_n} и напряжению K_{U_n} :

$$I_x = K_{I_n} I_2; \quad U_x = K_{U_n} U_2, \quad (5.8)$$

где $K_{I_n} = I_{1n}/I_{2n}$; $K_{U_n} = U_{1n}/U_{2n}$; I_2 , U_2 — значения измеренного тока и напряжения соответственно; I_{1n} , I_{2n} , U_{1n} , U_{2n} — номинальные значения токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора тока соответственно.

В реальных условиях эксплуатации измерительных трансформаторов номинальное значение коэффициента трансформации не равно реальному коэффициенту (K_I , K_U) $K_{I_n} \neq K_I$, $K_{U_n} \neq K_U$, что объясняется различными значениями измеряемых токов и напряжений, характером и значением нагрузки во вторичной цепи, конструкцией трансформатора и другими причинами. Поэтому определение измеряемых величин по номинальным коэффициентам трансформации приводит к погрешностям.

Для трансформатора тока относительная погрешность

$$\delta_I = \frac{I_x - I_1}{I_1} \cdot 100 = \frac{K_{I_n} - K_I}{K_I} \cdot 100, \quad (5.9)$$

а для трансформатора напряжения

$$\delta_U = \frac{U_x - U_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{K_{U_n} - K_U}{K_U} \cdot 100. \quad (5.10)$$

Кроме токовой погрешности δ_I и погрешности по напряжению δ_U , у измерительных трансформаторов имеется угловая погрешность, вызванная неточностью передачи фазы из одной обмотки в другую. Угловая погрешность измерительных трансформаторов оказывает влияние на погрешность измерительных приборов, показания которых зависят от фазовых сдвигов токов в этих приборах (фазометры, ваттметры).

С учетом указанных погрешностей введены четыре класса точности измерительных трансформаторов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5.

Для обеспечения нормальной работы измерительного трансформатора тока общее сопротивление его вторичной цепи не должно превышать номинальной нагрузки, которая нормирована (0,2; 0,6; 0,8; 1,2; 2 Ом). Увеличение сопротивления вторичной обмотки может вызвать перенапряжение и пробой изоляции. Таким образом, нормальная работа измерительного трансформатора тока обеспечивается в режиме короткого замыкания, а режим холостого хода является аварийным.

У измерительных трансформаторов напряжения вторичная обмотка нагружена на большое сопротивление, поэтому нормальная работа такого трансформатора обеспечивается в режиме, близком к холостому ходу, а уменьшение нагрузки приводит к аварийной ситуации.

Применение измерительных трансформаторов в цепях высокого напряжения обеспечивает также безопасный режим работы обслуживающего персонала, так как измерительные приборы включают в цепь низкого напряжения, имеющего заземление.

Согласующие трансформаторы предназначаются для сохранения неизменной величины сопротивления на их входе при разных сопротивлениях, нагружающих их выход. Обеспечивая преобразование сопротивлений, согласующие трансформаторы одновременно выполняют функции буферного согласования с нагрузкой и регулировки напряжения.

Свойства и конструкции согласующих трансформаторов определяются диапазоном частот, в котором они используются. Вторичную обмотку низкочастотного согласующего трансформатора делают секционированной. При изменении величины нагрузок ее переключают на соответствующую секцию, при этом сопротивление в первичной обмотке трансформатора остается неизменным.

В диапазоне СВЧ применяются согласующие трансформаторы в виде отрезков волновода или коаксиальной линии.

Измерительные усилители, решая в целом функции масштабирования и нормирования сигналов, обеспечивают поддержание на заданном уровне и с определенной точностью значение измерительных сигналов. Кроме того, измерительные усилители обеспечивают развязку отдельных трактов и линейный режим работы измерительных цепей,

обнаружение малых токов и напряжений в измерительных цепях (нулевые усилители), согласование входов измерительных приборов с источниками сигналов.

Измерительные усилители должны обладать стабильными метрологическими характеристиками. К усилителям предъявляют следующие основные требования:

- линейность и стабильность преобразования сигнала, обеспечивающие заданную погрешность;
- обеспечение заданного диапазона усиления;
- обеспечение заданной частотной избирательности;
- малые начальные токи и др.

По виду амплитудно-частотной характеристики используемые усилители разделяют на усилители переменного тока (напряжения) и усилители постоянного тока.

Усилители переменного тока (или просто усилители) должны обеспечивать постоянство коэффициента передачи в широком диапазоне частот $\Delta f = f_v - f_n$. Для этих характеристик допускается «завал» частотной характеристики в области нижних частот, т.е. $f_{\min} \neq 0$. К усилителям переменных токов относятся также селективные (избирательные) усилители.

Для усилителей постоянного тока (УПТ) нижняя граница частотного диапазона $f_n = 0$, т.е. $\Delta f = f_v$, например, усилители постоянного тока, используемые в аналоговых электронных вольтметрах, усиливают сигнал до значения, необходимого для эффективной работы электромеханического измерительного механизма, и согласуют его малое сопротивление с выходным сопротивлением преобразователя.

За счет повышения коэффициента усиления УПТ можно повышать чувствительность электронных вольтметров в целом. Однако эта принципиальная возможность при практической реализации наталкивается на технические трудности, связанные прежде всего с медленными самопроизвольными изменениями выходного сигнала при отсутствии на входе информационного сигнала. Дрейф нуля может сказаться на точности результатов измерений, и поэтому обычно предусматривается возможность установки нуля измерителя перед началом измерений.

Электронные усилители конструктивно могут исполняться в качестве узлов измерительных приборов или в качестве отдельных функционально законченных устройств, относящихся к подгруппе V. Первые каскады усилителей, предназначенных для усиления слабых сигналов, могут располагаться отдельно в выносном блоке (пробнике), обеспечивающем подключение непосредственно к источнику и тем самым снижающем паразитное влияние реактивностей соединительных проводов.

В зависимости от используемого активного элемента измерительные усилители бывают транзисторными, магнитными, на основе элементов с отрицательным сопротивлением и регулируемым реактивным сопротивлением, на туннельных диодах, на базе интегральных микросхем и молекулярными.

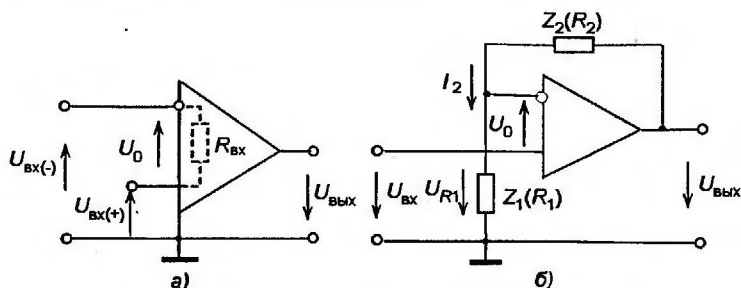


Рис. 5.5. Схемы операционных усилителей: а — эквивалентная; б — неинвертируемая

В современной измерительной технике используют в основном интегральные операционные усилители (ОУ) различных типов, представляющие собой усилители постоянного тока с большим коэффициентом усиления.

Операционные усилители имеют большое входное сопротивление (сотни МОм) и малое выходное (единицы Ом). Большое входное сопротивление обычно обеспечивается использованием во входном дифференциальном каскаде полевых и биполярных транзисторов, работающих в режиме микротоков. На эквивалентной схеме ОУ (рис. 5.5, а) $R_{ВХ}$ имитирует входное сопротивление, протекание тока через которое вызывается разностью напряжений между входами. Для эквивалентной схемы справедливо следующее:

- входное дифференциальное напряжение определяется разностью

$$U_0 = U_{ВХ(+)} - U_{ВХ(-)};$$

- коэффициент усиления по напряжению

$$K_H = \frac{U_{ВЫХ}}{U_0} \approx 10^4 \dots 10^7.$$

Для идеальной эквивалентной схемы $K_H = \infty$; $R_{ВХ} = \infty$; $R_{ВЫХ} = 0$; $U_0 = 0$; $I_0 = 0$.

Для неинвертирующего ОУ (рис. 5.5, б) справедливо следующее:

$$-U_{ВХ} = U_0 - U_{R1}; \quad U_{ВЫХ} = (1 + Z_2/Z_1)U_{ВХ};$$

для режима постоянного тока

$$U_{ВЫХ} = (1 - R_2/R_1)U_{ВХ};$$

если $R_2 = 0$, то $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$ и ОУ выполняет роль повторителя напряжения.

Кроме задач масштабного преобразования (усиления), ОУ могут использоваться в качестве компараторов, интеграторов и др.

5.2. Электромеханические измерительные механизмы

Структурная схема электромеханического измерительного механизма (ИМ) представлена на рис. 5.6.

Измерительный механизм воспринимает энергию измеряемого сигнала и преобразует ее в угловое перемещение некоторой подвижной части, жестко связанной с указателем. Для перемещения подвижной части необходимо, чтобы на нее действовал вращающий момент $M_{вр}$. Если на подвижную часть никакие другие силы не действуют, то ее отклонение будет максимальным независимо от величины вращающего момента. Чтобы каждому значению вращающего момента соответствовало свое отклонение подвижной части, необходим противодействующий момент $M_{пр}$, направленный навстречу вращающему и возрастающий по мере увеличения угла поворота стрелки α . Подвижная часть поворачивается до тех пор, пока возрастающий противодействующий момент не окажется равным вращающему:

$$M_{вр} = M_{пр}. \quad (5.11)$$

Все известные электромеханические измерительные механизмы работают на принципе использования энергии электромагнитного поля. Общее выражение для вращающего момента можно представить известным уравнением

$$M_{вр} = \frac{dW_{э.м}}{d\alpha},$$

где $W_{э.м}$ — кинетическая энергия электрических и магнитных полей, обусловленная измеряемой величиной тока или напряжения; α — угол поворота подвижной части механизма, т.е. $M_{вр}$ определяется как производная от электрической энергии по геометрической координате (уравнение Лагранжа второго рода).

Противодействующий момент $M_{пр}$ в рассматриваемых механизмах создается упругими элементами. Он пропорционален углу закручивания α упругого элемента и всегда направлен в сторону, противоположную $M_{вр}$:

$$M_{пр} = k\alpha, \quad (5.13)$$

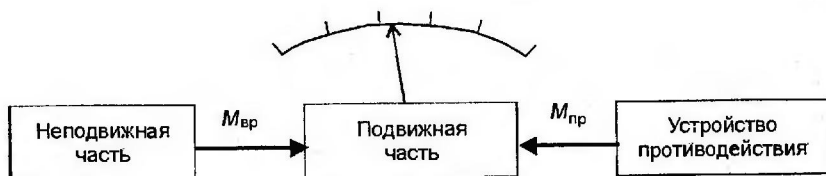


Рис. 5.6. Структурная схема электромеханического измерительного механизма

где k — удельный противодействующий момент (постоянный коэффициент), зависящий от свойств упругого элемента.

В соответствии с равенством (5.11) можно записать общее выражение для угла поворота α :

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{dW_{\text{э.м}}}{d\alpha}. \quad (5.14)$$

Несмотря на большое многообразие электромеханических ИМ, можно выделить ряд общих конструктивных элементов.

В качестве элементов, создающих противодействующий момент, используют обычно плоские или спиральные пружины, работающие на изгиб и кручение, а также растяжки и подвесы, работающие на кручение.

Наличие подвижной части в измерительных механизмах вызывает необходимость в специальных опорных устройствах, уменьшающих момент трения. Чаще всего опоры подвижной части выполняют на керрах.

В приборах высокой чувствительности подвижная часть обычно крепится на растяжках или ленточных подвесах.

В процессе движения к положению равновесия подвижная часть, накопив некоторую кинетическую энергию, по инерции проходит это положение, а затем начинает совершать колебания. Чтобы избежать этого, используют специальные устройства — успокоители. Чаще всего применяют воздушные и магнитоиндукционные успокоители.

Для визуального отсчитывания значений измеряемой величины используют отсчетные устройства, состоящие из шкалы и указателя. На шкалы отсчетного устройства наносятся отметки в виде коротких линий, интервал между которыми называют делением шкалы. Отметки шкалы, снабженные числами, называют числовыми отметками шкалы. Наименьшее значение измеряемой величины, указанное на шкале, называют начальным значением шкалы, наибольшее — конечным. Шкалы могут быть равномерными и неравномерными. Диапазон измерений определяют по начальному и конечному значениям шкалы.

В зависимости от способа преобразования электромагнитной энергии в механическую различают следующие системы измерительных механизмов: магнитоэлектрические, электромагнитные, электростатические, индукционные. Основные сравнительные характеристики указанных измерительных механизмов представлены в табл. 5.1.

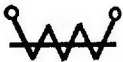
Рассмотрим принцип действия основных ИМ и области их применения.

В магнитоэлектрическом ИМ вращающий момент создается в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля проводника с током (обычно в виде катушки). В настоящее время используют магнитоэлектрические измерительные механизмы (МЭИМ) с подвижными катушкой и магнитом.

В приборах с подвижной катушкой неподвижную часть механизма образует магнитная система, состоящая из постоянного магнита, по-

Таблица 5.1

Характеристика электромеханических измерительных механизмов

Тип измерительного механизма	Условное обозначение	Вращающий момент	Уравнение шкалы	Примечание
Магнитоэлектрический (взаимодействие магнитных полей постоянного магнита и проводника (рамки) с током)		$M_{вп} = B_n S I$	$\alpha = \frac{B_n S}{k} I$ или $\alpha = S_1 I$	I — ток в обмотке рамки; S — активная площадь рамки; S_1 — чувствительность; n — число витков в обмотке; B — магнитная индукция; k — удельный противодействующий момент (постоянный коэффициент)
Электромагнитный (взаимодействие магнитного поля, создаваемого проводником с током, и ферромагнитного сердечника)		$M_{вп} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$	$\alpha = \frac{1}{2k} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$	L — индуктивность катушки; I — ток в обмотке катушки
Электродинамический (взаимодействие магнитных полей двух проводников с током)		$M_{вп} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}$	$\alpha = \frac{1}{k} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cos(I_1, I_2)$	I_1 — ток в подвижной катушке; I_2 — ток в неподвижной катушке; $M_{1,2}$ — взаимная индуктивность между подвижными и неподвижными катушками
Электростатический (взаимодействие двух заряженных электродов)		$M_{вп} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}$	$\alpha = \frac{1}{2k} U^2 \frac{dC}{d\alpha}$	U — напряжение между электродами; C — емкость между электродами

люсных наконечников и сердечника. В равномерном кольцевом зазоре магнитной системы расположена обмотка подвижной части (рамка), выполненная из изолированного медного проводника. На подвижной части крепится стрелка прибора.

Измеряемый ток I , протекая по рамке, создает действие пары сил F , создающих вращающий момент. Запас электрокинетической энергии рассматриваемого механизма определяется энергией постоянного магнита $W_{\text{пм}}$, магнитной энергией контура с током $W_{\text{к}}$ и энергией взаимодействия постоянного поля магнита с контуром $W_{\text{вз}}$ [26].

Используя общее уравнение (5.14) и полагая, что энергия постоянного магнита и контура с током неизменна, находим вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW}{d\alpha} = I \frac{d\varphi}{d\alpha} = IBnS,$$

где φ — магнитный поток, сцепляющийся с рамкой; B — магнитная индукция в зазоре; S — активная площадь рамки ($S = dl$); n — число витков.

Для установившегося режима, т.е. когда $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, отклонение

$$\alpha = I \frac{BnS}{k} = S_1 I_{\text{изм}}, \quad (5.15)$$

где S_1 — чувствительность прибора к току, не зависящая от угла поворота рамки и постоянная по всей длине шкалы, что определяет равномерность шкалы МЭИМ.

Достоинства МЭИМ: высокая чувствительность (до $3 \cdot 10^{-11}$ А); высокая точность (до класса 0,1); малое потребление мощности от измеряемой цепи ($10^{-5} \dots 10^{-6}$ Вт); линейность преобразования (шкала МЭИМ равномерная); малая чувствительность к изменениям температуры окружающей среды и внешним магнитным полям.

Недостатки: сравнительная сложность устройства; опасность перегрузок; возможность прямого использования только в цепях постоянного тока.

МЭИМ используют в качестве вольтметров, амперметров и гальванометров постоянного и переменного токов (в последнем случае с преобразованием переменного тока в постоянный), а также в качестве выходного показывающего прибора в электронных измерительных устройствах для измерения различных физических величин.

В электромагнитном измерительном механизме (ЭМИМ) вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля неподвижной катушки, по обмоткам которой протекает измеряемый ток с одним или несколькими ферромагнитными сердечниками, обычно составляющими подвижную часть, жестко скрепленную со стрелкой.

Как следует из уравнения преобразования (табл. 5.1), знак угла отклонения стрелки α не зависит от направления тока, т.е. ЭМИМ можно измерять как переменный (среднеквадратическое значение), так и постоянный ток. Шкалы ЭМИМ неравномерные, однако их неравномерность

можно улучшить, если подобрать соответствующим образом форму сердечников. Считается, что за счет изменения формы сердечника и его расположения можно получить практически равномерную шкалу, начиная с 20...25 % верхнего предела измеряемой величины.

Достоинства ЭМИМ: простота конструкции; способность выдерживать большие нагрузки; возможность прямого измерения постоянного и переменного токов.

Недостатки ЭМИМ: малая чувствительность; значительное потребление мощности от измеряемой цепи (до 1 Вт); нелинейность шкалы (сжата в начале и растянута в конце); сильное влияние внешних магнитных полей; малая точность, объясняемая наличием ферромагнитного сердечника, в котором возникают вихревые токи и магнитный гистерезис.

ЭМИМ широко применяют для измерения напряжений и токов в сильноточных цепях постоянного и переменного токов промышленной частоты.

В электродинамических измерительных механизмах (ЭДИМ) вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с током.

При наличии токов в обмотках катушек измерительного механизма возникает вращающий момент, стремящийся повернуть подвижную часть так, чтобы магнитные потоки неподвижной и подвижной катушек совпали. При измерении в цепях постоянного тока отклонение подвижной части электродинамического механизма пропорционально произведению токов в обмотках катушек (см. табл. 5.1), а при измерении в цепях переменного тока отклонение подвижной части зависит и от косинуса угла между векторами токов:

$$\alpha = \frac{1}{k} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cos(I_1 I_2). \quad (5.16)$$

Достоинства ЭДИМ: возможность использования ЭДИМ не только для измерения напряжений и токов, но и для измерения мощности постоянного и переменного токов; малая погрешность, так как в механизме нет железа.

Недостатки ЭДИМ: большая потребляемая мощность; малая чувствительность; сложность конструкции; нелинейность шкалы; влияние температуры и внешнего магнитного поля.

Для увеличения чувствительности (увеличения вращающего момента) магнитные цепи катушек заполняют ферромагнитным материалом. Это приводит к увеличению вращающего момента, чем обеспечивается хорошая защита от внешних магнитных полей, однако наличие сердечника приводит к увеличению погрешности прибора. Приборы с ЭДИМ, снабженные ферромагнитным сердечником, называют ферродинамическими.

В электростатических измерительных механизмах (ЭСИМ) вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух электрически заряженных тел, одно из которых неподвижно.

Конструктивно они выполняются в виде неподвижной и подвижной пластин, к которым прикладывается измеряемое напряжение. Как следует из уравнения шкалы (см. табл. 5.1), такие приборы непосредственно пригодны только для измерения постоянного и переменного напряжений.

Достоинства ЭСИМ: большие пределы измерений напряжения; большое входное сопротивление; малое потребление мощности от измеряемой цепи (на постоянном токе мощность не потребляется); широкий диапазон измеряемых напряжений (до 30 МГц).

Недостатки ЭСИМ: малая чувствительность; изменение емкости в процессе измерения; нелинейность шкалы; влияние внешнего электрического поля.

В зависимости от конструкции ЭСИМ применяют для измерения напряжений маломощных цепей в широком диапазоне частот, а также в цепях высокого напряжения для измерения напряжения до сотен киловольт без добавочных сопротивлений.

5.3. Преобразователи значений величин

Рассматриваемые преобразователи нашли большое применение в аналоговых измерительных приборах в качестве детекторных устройств.

По характеру преобразования различают преобразователи средневыпрямленных, среднеквадратических и пиковых значений, а по типу используемых преобразовательных элементов наибольшее применение находят полупроводниковые и термоэлектрические. С точки зрения влияния на схему постоянной составляющей сигнала различают преобразователи с открытым и закрытым входами.

Преобразователи средневыпрямленных значений (линейные) выполняют функцию преобразования переменного напряжения в постоянное, пропорциональное средневыпрямленному значению. Они осуществляют трансформацию мгновенных значений $u(t)$ в модуль $|u(t)|$.

Преобразователи средневыпрямленных значений работают по схемам двухполупериодного или однополупериодного выпрямления (рис. 5.7, 5.8).

В качестве выпрямительных элементов используют полупроводниковые (германиевые или кремниевые) диоды. Выпрямляющее действие таких диодов определяется коэффициентом выпрямления

$$K_v = I_{пр}/I_{обр} = R_{сб}/R_{пр}, \quad (5.17)$$

где $I_{пр}$ и $I_{обр}$ — прямой и обратный токи; $R_{пр}$ и $R_{сб}$ — прямое и обратное сопротивления диода.

Порядок коэффициентов выпрямления $10^3 \dots 10^5$.

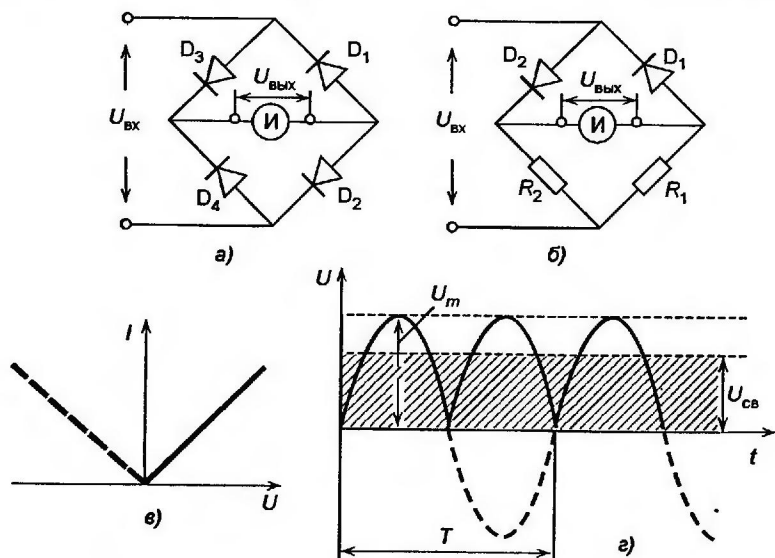


Рис. 5.7. Двухполупериодные преобразователи средневыхрявленных значений: а, б — схемы; в — вольт-амперная характеристика; г — временная диаграмма

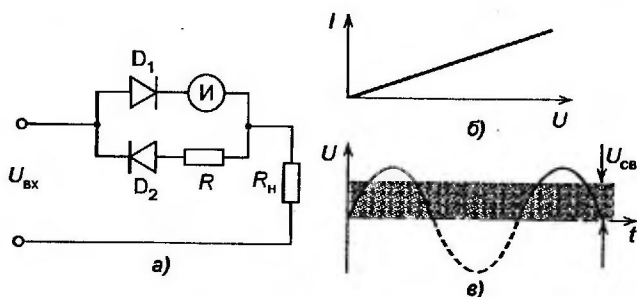


Рис. 5.8. Однополупериодные преобразователи средневыхрявленных значений: а — схема; б — вольт-амперная характеристика; в — временная диаграмма

Проанализируем работу преобразователя, собранного по двухполупериодной схеме (см. рис. 5.7). При положительной полуволне измеряемого напряжения $U_x(t)$ прямой ток проходит через диод D_3 , резистор R_n и диод D_2 . Если считать диоды одинаковыми и пренебречь обратным током, то можно записать

$$I_{\text{пр}} = U_{\text{вх}} / (2R_{\text{пр}} + R_n). \quad (5.18)$$

При отрицательной полуволне измеряемого напряжения $U_x(t)$ прямой ток проходит через D_4 , R_n , D_1 .

С резистора R_n снимается выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = R_n I_{\text{пр}}.$$

Таким образом, измеряемое напряжение пропорционально среднему выпрямленному току, т.е. происходит трансформация $u(t)$ в модуль $|u(t)|$.

В общем случае вольт-амперные характеристики используемых в схеме диодов (см. рис. 5.7,в) не строго линейны, а значит, нелинейно $R_{пр}$ и $U_{вых}$ будет нелинейно связано с измеряемым напряжением, следовательно, преобразователь будет выполнять операции нахождения модуля $U_x(t)$ с погрешностями. Для линеаризации рассматриваемого преобразователя сопротивление R_n выбирают из условия $R_n \gg R_{пр}$, тогда прямой ток можно считать линейно зависящим от $U_{вх}$. Но с увеличением R_n снижается чувствительность преобразователя, т.е. чем больше R_n , тем меньше $U_{вых}$ при том же $U_{вх}$.

На практике часто используют также преобразователи, собранные по схеме с двумя диодами. В данном случае при положительном полупериоде ток проходит через D_2 и R_2 , а при отрицательном полупериоде — через D_1 и R_1 , т.е. в данной схеме роль нагрузочного сопротивления выполняют резисторы R_1 и R_2 .

Кроме рассмотренных преобразователей, собранных по схеме двух-полупериодного выпрямления, используют также преобразователи однополупериодного выпрямления (см. рис. 5.8). В данном случае ток через измерительный прибор протекает только в течение одного полупериода измеряемого напряжения.

Преобразователи среднеквадратических значений (квадратичные) выполняют операцию квадратирувания измеряемого напряжения (операцию возведения в квадрат). Такую операцию могут выполнять детекторы, обладающие квадратичной вольт-амперной характеристикой. В современных вольтметрах операция квадратирувания обычно осуществляется с помощью диодных аппроксиматоров и термоэлектрических преобразователей.

Диодные аппроксиматоры обычно выполняют на диодных цепочках, обеспечивающих с достаточной степенью приближения формирование параболы [55]. Суть работы таких преобразователей состоит в том, что ветвь параболы ($i = bu^2$) аппроксимируется ломаной линией (рис. 5.9). Для получения такой аппроксимации необходимо иметь набор элементов, обладающих следующими свойствами:

- характеристики элементов должны быть линейны;
- наклоном этих характеристик можно управлять;
- характеристики должны начинаться с определенного значения E .

Всем этим требованиям удовлетворяют элементы в виде диода и двух резисторов (рис. 5.10,а).

Действительно, линейность характеристики (рис. 5.10,б) в таких ячейках обеспечивается подбором сопротивлений резистора R_1 и прямого сопротивления диода так, что $R_1 \gg R_{пр}$; наклон характеристики (угол α_1) зависит от величины R_1 ; начало характеристики определяется смещением E , поданным на диод с делителя R_1-R_2 :

$$E = ER_2/(R_1 + R_2). \quad (5.19)$$

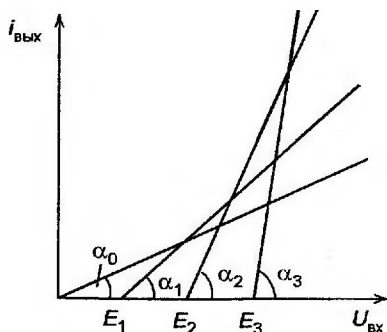


Рис. 5.9. Характеристики диодных аппроксимирующих ячеек

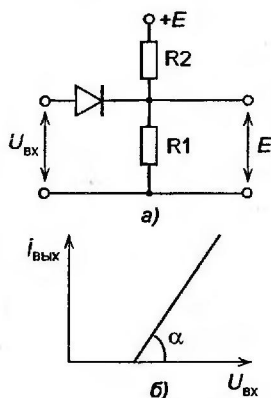


Рис. 5.10. Диодная аппроксимирующая ячейка: а — схема; б — характеристика

Чем больше рассмотренных ячеек включено в общую схему аппроксиматора, тем выше качество приближения ломаной линии к параболе.

Преобразователи пиковых значений должны обеспечивать напряжение на своем выходе в соответствии с пиковым значением преобразуемого сигнала. Для такого преобразования необходимы элементы памяти, запоминающие пиковое значение напряжения. Таким элементом обычно служит конденсатор, заряжаемый через диод до пикового значения. В зависимости от места включения конденсатора различают пиковые детекторы с открытым и закрытым входами.

Если на амплитудный детектор с открытым входом подается синусоидальное напряжение $U_x = U_m \sin \omega t$, то конденсатор C заряжается в полярности, показанной на рис. 5.11, по цепи: источник напряжения с внутренним сопротивлением $R_i \rightarrow$ открытый диод с сопротивлением $R_d \rightarrow$ конденсатор $\rightarrow$ источник напряжения. Постоянная времени заряда конденсатора $\tau_z = (R_i + R_d)C$. Если постоянная времени τ_z мала и меньше периода исследуемого сигнала ($\tau_z < T$), то в момент t_1 диод будет закрыт напряжением быстро зарядившегося конденсатора. Затем конденсатор начнет разряжаться по цепи: верхняя обкладка конденсатора $\rightarrow$ резистор $R_n \rightarrow$ нижняя обкладка конденсатора. Постоянная времени разряда $\tau_p = CR_n > T$. Параметры схемы подбираются так, чтобы $\tau_p \gg \tau_z$, т.е. чтобы за время отрицательной полуволны разряд конденсатора был незначительным. Очередной заряд конденсатора при следующей положительной полуволне начнется в момент t_2 , когда измеряемое напряжение U_x станет больше напряжения на C . Через несколько периодов быстрого заряда и медленного разряда конденсатора на нем установится постоянное среднее напряжение U_{cp} , почти равное амплитуде U_m . В установившемся режиме $U_{cp} \approx U_m$, т.е. среднее значение на конденсаторе поддерживается близким к амплитудному значению

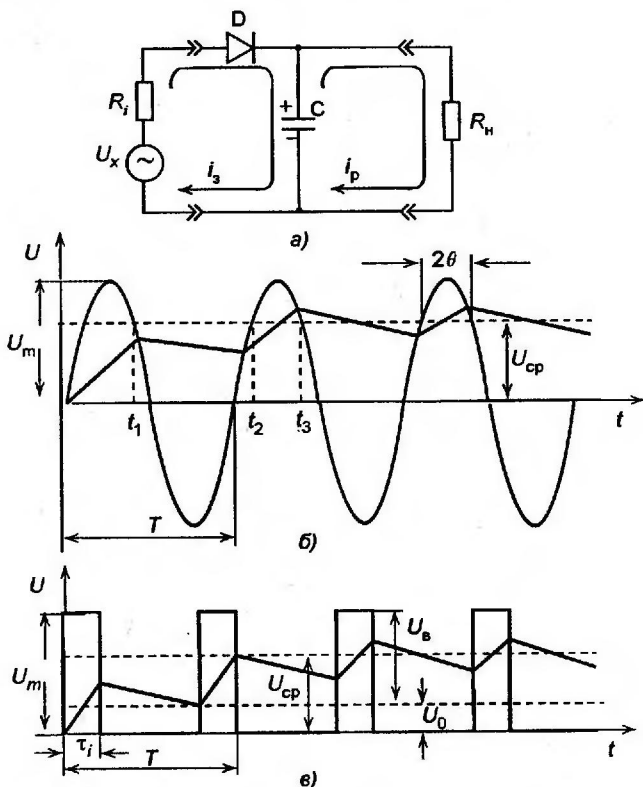


Рис. 5.11. Преобразователь пиковых значений с открытым входом: а — схема; б, в — временные диаграммы

измеряемого напряжения. Однако U_{cp} всегда отличается от U_m на некоторую величину, и на интервале (t_2, t_3) через диод проходят маленькие импульсы тока, пополняющие заряд конденсатора.

Часть периода синусоидального сигнала на интервале (t_2, t_3) , т.е. когда ток проходит через диод, оценивается углом отсечки θ . Напряжение U_{cp} тем ближе к U_m , чем меньше угол отсечки (рис. 5.11):

$$U_{cp} = U_m \cos \theta. \quad (5.20)$$

В теории идеального детектора устанавливается зависимость между углом отсечки и параметрами схемы [26]:

$$\theta = \sqrt[3]{3\pi \frac{R_i + R_n}{R_n}}. \quad (5.21)$$

Из соотношений (5.20) и (5.21) следует, что равенство $U_{cp} = U_m$, достигаемое при $\theta = 0$, никогда не может быть реализовано, так как $R_i \neq 0$ и $R_n \neq \infty$.

Следовательно, методическая погрешность преобразования $\Delta = U_{\text{ср}} - U_m$ будет тем меньше, чем меньше $(R_i + R_d)$ и больше R_n . Однако в реальных условиях значения указанных сопротивлений, а также емкость C выбирают из компромиссных условий. Чрезмерное увеличение R_n приводит к чрезмерному увеличению τ_p и, как следствие, к повышению инерционности схемы, т.е. при уменьшении напряжения на входе напряжение на конденсаторе долго остается неизменным (до нескольких секунд). Недопустимо также использовать конденсатор C очень большой емкости, так как это приводит к возрастанию τ_3 и τ_p .

Таким образом, рассматриваемый детектор «запоминает» максимальное положительное напряжение.

Если измеряемое напряжение $U_x = U_0 + U_m \sin \omega t$, т.е. имеется постоянная составляющая U_0 , то она также через диод поступит в цепь заряда конденсатора, который зарядится до напряжения

$$U_C \approx U_0 + U_m,$$

где U_m — амплитуда полупериода переменной составляющей.

Если на вход рассматриваемого преобразователя с открытым входом подать импульсное напряжение (например, периодическую последовательность прямоугольных импульсов), то и в этом случае $U_C \approx U_m$, если длительность импульса $\tau_{\text{и}} > \tau_3$ и $\tau_{\text{и}} < \tau_p$. Однако, если период следования импульсов будет большим и за время пауз между импульсами конденсатор успеет значительно разрядиться, то установившееся среднее значение на конденсаторе $U_{\text{ср}}$ будет еще больше отличаться от U_m , т.е. появится дополнительная погрешность. Эта погрешность будет проявляться тем сильнее, чем больше скажность последовательности импульсов, определяемая отношением периода следования импульсов ($T_{\text{и}}$) к их длительности (τ):

$$Q = T_{\text{и}}/\tau.$$

Таким образом, показания вольтметра с открытым входом будут соответствовать максимальному значению суммарного приложенного напряжения, что для прибора с пиковым детектором следует рассматривать как недостаток.

Указанный недостаток устраняется в схемах с закрытым входом (рис. 5.12).

В схемах пиковых детекторов с закрытым входом диод подключен параллельно резистору нагрузки R_n . При подаче на вход гармонического напряжения $U_x = U_m \sin \omega t$ физический процесс выпрямления здесь такой же, как в схемах с открытым входом, имеется лишь некоторое различие в цепях заряда и разряда конденсатора. Если пренебречь шунтирующим действием фильтра, т.е. считать, что входное сопротивление ФНЧ много больше сопротивления резистора R_n , то постоянная времени заряда конденсатора $\tau_3 = (R_i + R_d)C$, а постоянная разряда $\tau_p = C(R_n + R_i)$.

При соблюдении условий $\tau_3 < T$ и $\tau_p \gg T$, как и в схеме с открытым входом, в установившемся режиме среднее значение напряжения

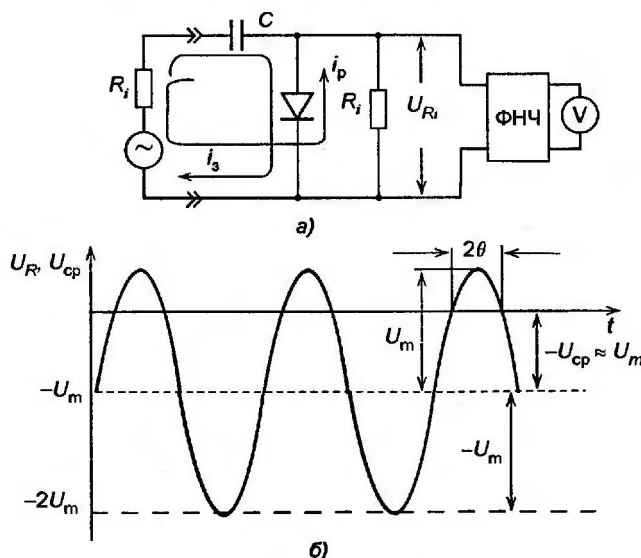


Рис. 5.12. Преобразователь пиковых значений с закрытым входом: а — схема; б — временная диаграмма

на конденсаторе U_{cp} приблизительно равно максимальному значению входного напряжения U_m .

Основное отличие данной схемы от схемы с открытым входом состоит в том, что выходное напряжение U_{R_x} детектора определяется как результат взаимодействия входного напряжения и напряжения на конденсаторе:

$$U_{R_x} = U_m \sin \omega t - U_{cp}.$$

Это напряжение изменяется почти от 0 до $-2U_m$ (см. рис. 5.12), т.е. является пульсирующим. Для устранения этого негативного явления используют ФНЧ, пропускающий только постоянную составляющую U_C пульсирующего напряжения, следовательно, прибор измеряет напряжение $U_C \approx U_m$.

Таким образом, при измерении напряжений, не содержащих постоянной составляющей, детекторы с открытым и закрытым входами дают одинаковые результаты, т.е. измеренное напряжение весьма близко к U_m , и показания обоих вольтметров пропорциональны амплитуде измеряемого напряжения.

Если напряжение U_x , поступающее на вход детектора с закрытым входом, имеет постоянную составляющую U_x , т.е. $U_x = U_0 + U_m \sin \omega t$, то конденсатор зарядится дополнительно и напряжение на его обкладках увеличится на U_0 , т.е. $U_C \approx U_m + U_0$. Однако полярность дополнительной постоянной составляющей напряжения на конденсаторе ($-U_0$) противоположна полярности составляющей U_0 , действующей на входе

детектора. Алгебраическая сумма этих двух напряжений на R_n будет равна нулю, и вольтметр не будет реагировать на постоянную составляющую U_0 входного напряжения.

Таким образом, в пиковых детекторах с закрытым входом вольтметр измеряет пиковое значение напряжения без постоянной составляющей, т.е. пиковое значение превышения над постоянной составляющей или, иначе говоря, постоянная составляющая на выходе детектора с закрытым входом равна амплитудному значению лишь переменного сигнала на входе.

Сделанный вывод справедлив и при измерении пиковым вольтметром с закрытым входом импульсных сигналов. Покажем это на примере рассмотрения работы пикового вольтметра с закрытым входом при измерении напряжения периодической последовательности положительных импульсов.

Измеряемое напряжение содержит постоянную составляющую U_0 (рис. 5.13).

Относительно уровня этой постоянной составляющей во входном напряжении можно отметить положительный импульс с амплитудой U_{m+} и отрицательный с амплитудой U_{m-} , так что U_{m+} и U_{m-} в сумме дают U_m . Для этих импульсов, отсчитанных от уровня постоянной составляющей, справедливо равенство

$$U_{m+}\tau = U_{m-}(T - \tau).$$

Анализируя рис. 5.13, можно сделать вывод: несмотря на то, что физически на входе вольтметра отрицательного импульса нет, импульсный вольтметр с закрытым входом, включенный на измерение отрицательного импульса, будет давать показания. В частности, если длительность импульса равна половине периода, показания вольтметра при включении на измерение положительного и отрицательного импульсов будут одинаковы.

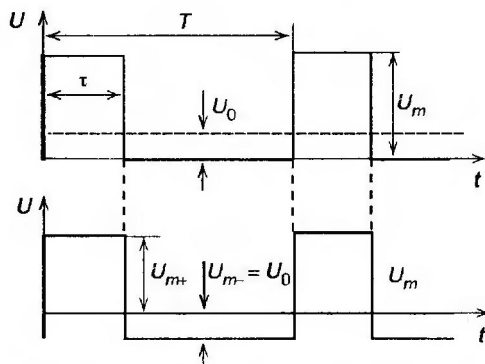


Рис. 5.13. Временные диаграммы, поясняющие работу типового детектора с закрытым входом

Для измерения напряжения последовательности импульсов отрицательной полярности нужно изменить полярность включения диода. В этом случае конденсатор будет заряжаться через R_n , а разряжаться через открытый диод.

Путем двух замеров импульсного напряжения (при прямом и обратном включении диода) можно найти максимальное значение измеряемых импульсов с учетом постоянной составляющей. Оно равно сумме первого и второго показаний вольтметра.

При использовании пикового преобразователя с закрытым входом для измерения импульсных периодических последовательностей необходимо учитывать особенности, связанные не только с влиянием постоянной составляющей, но и со скважностью сигнала. Здесь должно выполняться условие $\tau_3 < \tau_n$, $\tau_p \gg T$. В противном случае, когда $\tau_n < \tau_3$ и τ_p соизмерима с T , появляется дополнительная погрешность.

Термоэлектрические преобразователи. Действие термоэлектрических преобразователей основано на свойствах термопреобразующих элементов.

Практическое применение находят преобразователи на термопарах и терморезисторах. Преобразователь на термопарах (рис. 5.14) представляет собой нагреватель 1, по которому протекает измеряемый ток, и связанную с ним термопару 2. К свободным концам термопары обычно подключается магнитоэлектрический измеритель.

Принцип действия преобразователя основан на возникновении термоЭДС в месте соединения двух разнородных проводников при их нагреве. Возникающая на свободных концах термопары термоЭДС пропорциональна разности температур:

$$E_T = \alpha(T_1 - T_2), \quad (5.22)$$

где α — коэффициент пропорциональности, зависящий от материала и конструкции термопары; T_1 , T_2 — температура в месте соединения термопары с нагревателем и в свободном пространстве соответственно.

В установившемся состоянии T_1 постоянна и определяется рассеиваемой на нагревателе мощностью. Следовательно, справедливо равенство

$$I^2 R_n = k(T_1 - T_2), \quad (5.23)$$

где k — коэффициент теплоотдачи.

Из равенства (5.22) и (5.23), исключив $(T_1 - T_2)$, получаем

$$E_T = \alpha_T I^2, \quad (5.24)$$

где $\alpha_T = \alpha R_n / k$ — коэффициент пропорциональности; R_n — сопротивление нагревателя; I — среднеквадратическое значение преобразуемого тока.

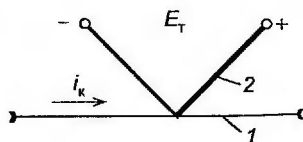


Рис. 5.14. Термоэлектрический преобразователь на термопарах

Рассматриваемые термопреобразователи могут использоваться в широком диапазоне частот. Преобразованная при этом величина не зависит от формы кривой исследуемого сигнала. Однако термопреобразователи обладают повышенной чувствительностью к перегрузкам, тепловой инерционностью, значительным собственным потреблением мощности и зависимостью термоЭДС от температуры окружающей среды.

Преобразователи на терморезисторах в основном применяют в приборах для измерения мощности в области высоких частот, преобразовательными элементами в этом случае служат термисторы. Преобразователи на терморезисторах выполняют, как правило, по мостовой схеме. Их принцип действия основывается на разбалансе моста при измерении собственного сопротивления терморезистора.

5.4. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) является одним из основных функциональных элементов цифровых измерительных приборов. АЦП представляет собой устройство, обеспечивающее совокупность процессов квантования, дискретизации и кодирования аналогового сигнала. Исходя из указанной совокупности процессов, происходящих в АЦП, его обобщенную структурную схему принято представлять в виде трех взаимосвязанных элементов (рис. 5.15).

В дискретизирующем устройстве реализуется процесс преобразования непрерывного во времени сигнала $x(t)$ в дискретный сигнал $x(t_i)$. При этом значения дискретного сигнала равны мгновенным значениям исходного непрерывного сигнала в фиксированные моменты времени. Промежутки времени между двумя соседними дискретными моментами времени называют шагом дискретизации (Δt) (рис. 5.16).

В цифровых измерительных приборах значение сигнала измеряется только в фиксированные моменты времени $x(t_i)$. Частота дискретизации выбирается из противоречивых условий. Действительно, чем больше частота дискретизации $f_d = 1/\Delta t$, тем меньше потери измерительной информации, но это приводит к ужесточению требований по быстродействию АЦП и, следовательно, к его усложнению.

Задача правильного выбора частоты дискретизации это фактически задача выбора интервала интерполяции Δt . При этом под правильно выбранной частотой дискретизации следует понимать такую частоту, при которой погрешность интерполяции оказывается не более заданной.

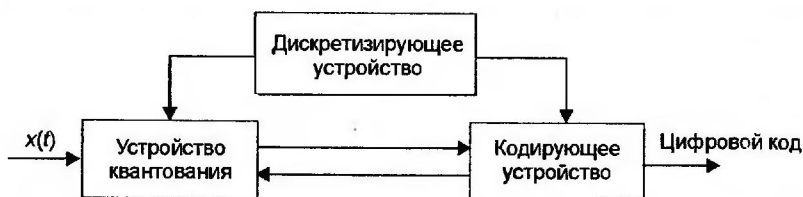


Рис. 5.15. Структурная схема аналого-цифрового преобразователя

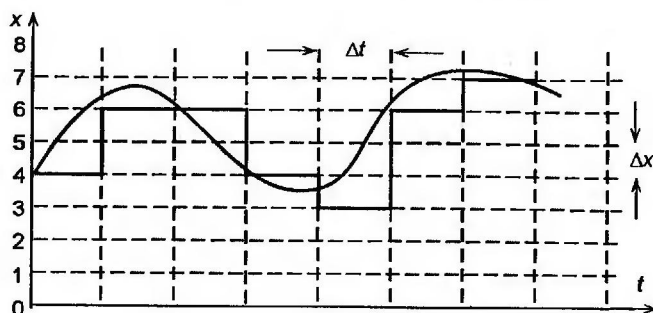


Рис. 5.16. Квантование и дискретизация аналогового сигнала

При решении этой задачи принято рассматривать различные интерполяционные полиномы.

В устройстве квантования происходит процесс замены мгновенных значений непрерывной по размеру величины $x(t_i)$ ближайшими квантованными значениями $x_{\text{кв}}(t_i)$. Разность Δx между двумя соседними уровнями называется шагом квантования.

При квантовании, как и при дискретизации, теряется часть информации о непрерывной измеряемой величине $x(t)$, следовательно, квантующее устройство, как и дискретизирующее, является источником методической погрешности.

Оценивание величины погрешности квантования проведем на основе сравнения идеальной функции преобразования измеряемой величины x с реальной ступенчатой функцией преобразования АЦП (рис. 5.17, а):

$$y = n\Delta x, \quad (5.25)$$

где Δx — шаг равномерного квантования; $n = 0, 1, \dots, N$ — номер соответствующего уровня квантования.

Из сравнения реальной и идеальной функций преобразования следует, что погрешность квантования $|\Delta_{\text{кв}}| \leq 0,5\Delta x$.

Из рис. 5.17, б видно, что погрешность квантования имеет характер ломанной линии. При таком характере погрешности квантования среднеквадратическое значение погрешности квантования, характеризуемое средней мощностью за длительность одного зубца, определяется равенством

$$P_{\text{ш.кв}} = \Delta x^2/12. \quad (5.26)$$

В кодирующем устройстве происходит представление дискретного значения сигнала в удобном для последующей обработки виде, например в двоичной системе счисления.

Таким образом, процесс преобразования аналогового сигнала $x(t)$ в цифровой сигнал неизбежно приводит к возникновению погрешностей, вызванных процедурами дискретизации и квантования.

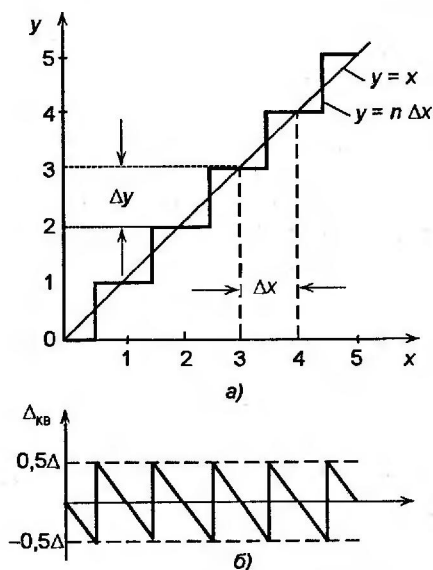


Рис. 5.17. Диаграммы, поясняющие погрешность квантования: а — идеальная и квантованная функции преобразования АЦП; б — кривая погрешности квантования

Погрешность АЦП определяется суммой методической (Δ_m) и инструментальной ($\Delta_{и}$) составляющих:

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_{и}.$$

Методическая погрешность определяется принципом работы преобразователя и зависит от погрешности дискретизации и квантования, а инструментальная погрешность определяется нестабильностью работы узлов и элементов АЦП.

Кроме погрешности, АЦП характеризуются ценой деления, разрешающей способностью, чувствительностью, быстродействием.

В измерительной технике используют АЦП прямого и уравнивающего преобразования. Прямое аналого-цифровое преобразование реализуется одним из следующих способов: время-импульсное кодирование; амплитудное кодирование; пространственное кодирование; число-импульсное кодирование; частотно-импульсное кодирование.

В измерительных приборах, используемых для измерения радиотехнических величин, наибольшее распространение получили время-импульсное и частотно-импульсное кодирования.

Рассмотрим работу время-импульсного преобразователя, используемого при измерении напряжения.

Аналого-цифровой преобразователь времяимпульсного действия работает на основе последовательного преобразовании измеряемого напряжения U_x в пропорциональный ему временной интервал Δt .

В течение этого интервала времени на электронный счетчик поступают импульсы с известной частотой повторения, число которых пропорционально величине измеряемого постоянного напряжения.

Последовательность работы рассматриваемого АЦП (рис. 5.18, а) поясняется временными диаграммами (рис. 5.18, б). При подаче на вход АЦП измеряемого напряжения U_x по сигналу с устройства управления показания счетчика и ЦОУ сбрасываются, а генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) начинает формировать пилообразное напряжение $U_{\text{глин}}$ (режим управления может быть ручным или автоматическим). В это же время (t_1) на выходе компаратора начинает формироваться импульс. При поступлении этого импульса на временный селектор (схема И) последний открывается и пропускает на вход счетчика импульсы с генератора счетных импульсов ($f_{\text{сч}}$). При достижении

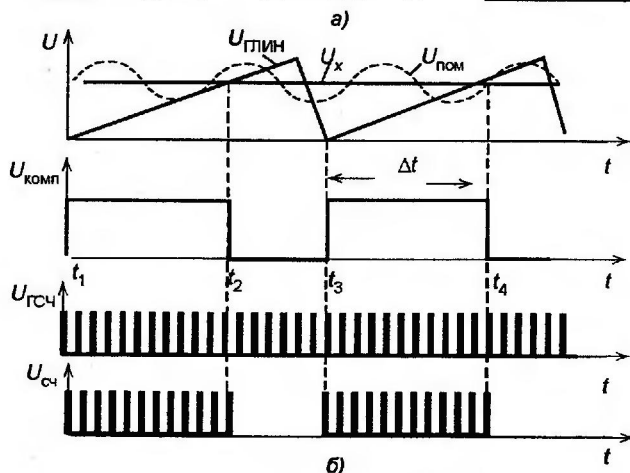


Рис. 5.18. АЦП время-импульсного действия: а — структурная схема; б — временная диаграмма

равенства $U_{\text{глин}} = U_x$ (момент t_2) формирование импульса на выходе компаратора прекращается, схема И закрывается и счет импульсов прекращается. В результате счетчик регистрирует некоторое число импульсов N за интервал $\Delta t = t_2 - t_1$, а ЦОУ отображает соответствующее ему число. В дальнейшем рассмотренная процедура работы продолжается.

Длительность интервала подсчета импульсов

$$\Delta t = N/f_{\text{сч}} = NT_{\text{сч}}. \quad (5.28)$$

С другой стороны,

$$\Delta t = U_x / \text{tg } \alpha. \quad (5.29)$$

Сравнивая (5.28) и (5.29), получаем

$$U_x = NT_{\text{сч}} \text{tg } \alpha.$$

Поскольку множитель $\text{tg } \alpha$ численно равен скорости V изменения пилообразного напряжения, В/с, то

$$U_x = NT_{\text{сч}} V.$$

Для каждого прибора произведение $T_{\text{сч}} \text{tg } \alpha = k$ постоянно, поэтому можно считать

$$U_x = kN.$$

Для конкретных схем АЦП значение $T_{\text{сч}} V$ выбирается равным 10^k , $k = 0, 1, 2, \dots$. Тогда

$$U_x = N \cdot 10^k. \quad (5.30)$$

Число 10^k обычно учитывают положением запятой на ЦОУ или указанием единицы измерения (В, мВ, мкВ).

Суммарная погрешность описанного АЦП определяется следующими причинами:

1) погрешностью преобразования измеряемого напряжения в длительность прямоугольного импульса (нелинейность $U_{\text{глин}}$, нестабильность скорости изменения $U_{\text{глин}}$, погрешность компаратора);

2) погрешностью преобразования интервала Δt в унитарный код, т.е. в число импульсов N (нестабильность следования счетных импульсов, погрешность дискретизации ± 1 импульс).

Общая погрешность рассматриваемых преобразователей составляет обычно 0,1 %.

Заметим, что в рассматриваемой схеме погрешность преобразования измеряемого напряжения во временной интервал существенно зависит от функциональной помехи $U_{\text{пом}}$, накладываемой на входной сигнал в момент t_2 (рис. 5.18,б), т.е. происходит преобразование мгновенного значения входного напряжения, что является причиной низкой помехозащищенности преобразователя. Более помехоустойчивой является схема с двойным интегрированием.

Аналого-цифровой преобразователь с двойным интегрированием работает следующим образом. Напряжение U_x за определенное время интегрируется, т.е. преобразуется в пропорциональное напряжение на выходе интегратора. Затем за счет возврата интегратора в исходное состояние накопленное в интеграторе напряжение преобразуется в пропорциональный временной интервал. В течение этого интервала времени на электронный счетчик поступают импульсы с известной частотой повторения, число которых пропорционально величине измеряемого постоянного напряжения.

Структурная схема и временные диаграммы работы АЦП показаны на рис. 5.19, а, б. По сигналу запуска фронтом калиброванного импульса, поступающего от устройства управления в момент t_0 , замыкается первый ключ (Кл. 1). В результате на вход интегратора подается напряжение U_x .

На выходе интегратора начинает линейно расти напряжение (U_4). Интегратор заряжается входным напряжением в течение фиксированного времени T_1 . По окончании этого времени, т.е. в момент t_1 напряжение на входе интегратора

$$U_4(T_1) = \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^{T_1} U_x dt = U_x \frac{T_1}{R_1 C_1}, \quad (5.31)$$

где T_1 — длительность заполнения интегратора; $R_1 C_1 = \tau_s$ — постоянная времени интегрирования (заполнения).

По окончании действия импульсного напряжения, т.е. в момент t_1 через ключ Кл. 2 на вход интегратора начинает подаваться образцовое напряжение U_0 , обратное по знаку напряжению U_x , а напряжение на выходе интегратора начинает падать.

При этом счетчик начинает работать в режиме суммирования, считая импульсы, поступающие с генератора счетных импульсов. Счет импульсов происходит до момента t_2 , когда напряжение на выходе интегратора станет равным нулю, о чем будет свидетельствовать сигнал на устройство управления с компаратора. В этот момент по окончании действия U_2 закрывается временной селектор. Длительность интервала T_2 зависит от измеряемого напряжения U_x , заполнившего интегратор к моменту t_1 . К моменту t_2 напряжение на выходе интегратора уменьшится на величину

$$U_4(t_2) = \frac{1}{R_2 C_2} \int_0^{T_2} U_0 dt = U_0 \frac{T_2}{R_2 C_2}, \quad (5.32)$$

где $R_2 C_2 = \tau_p$ — постоянная времени интегрирования (разряда).

В конце полного цикла, т.е. в конце интервала $(T_1 + T_2)$,

$$U_4(T_2) = U_4(T_1 + T_2) = U_x \frac{T_1}{R_1 C_1} - U_0 \frac{T_2}{R_2 C_2} = 0.$$

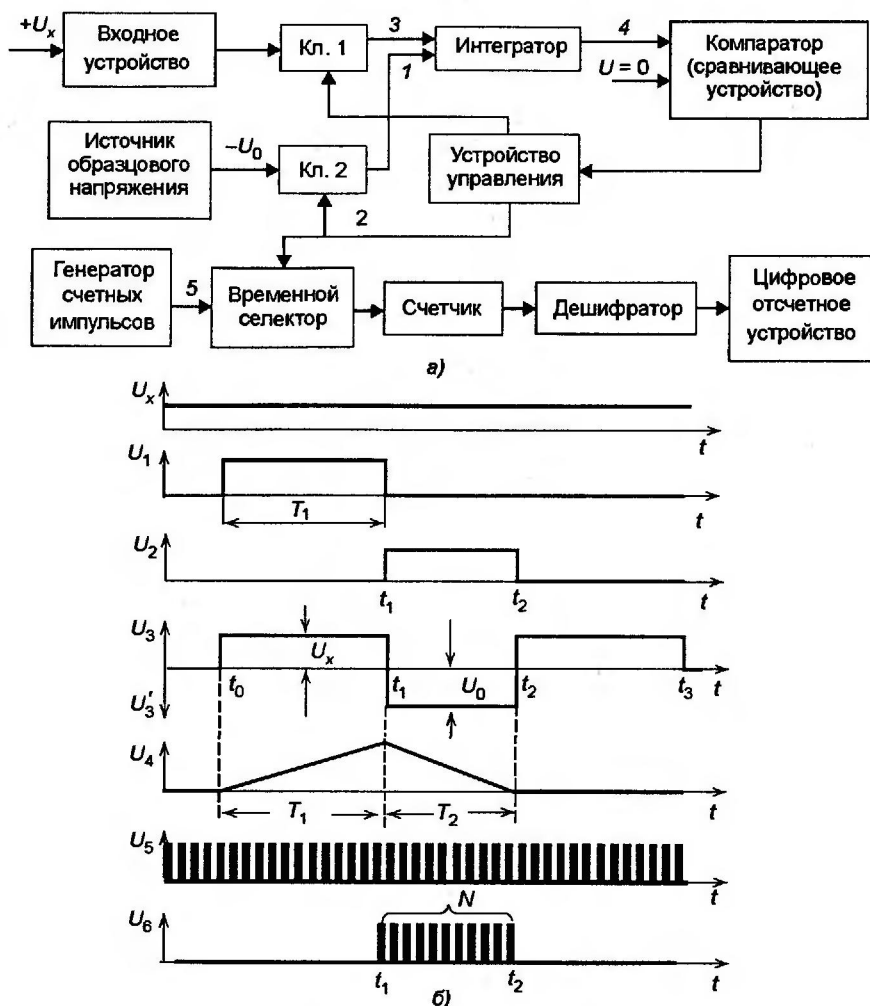


Рис. 5.19. АЦП с двойным интегрированием: а — структурная схема; б — временная диаграмма

Учитывая, что $T_2 = NT_{\text{сч}}$ и $r_3 = r_p$, получаем

$$U_x = U_0 \frac{T_2}{T_1} = NU_0 \frac{T_{\text{сч}}}{T_1}. \quad (5.33)$$

Если выбрать $U_0 T_{\text{сч}} / T_1 = 10^k$, $k = 0, 1, 2$, то

$$U_x = 10^k N. \quad (5.34)$$

т.е. измеряемое входное напряжение пропорционально количеству импульсов на выходе временного селектора.

Погрешность рассматриваемого АЦП определяется следующими основными причинами:

- нестабильностью опорного напряжения U_0 (можно снизить, используя нормальный элемент);
- порогом чувствительности сравнивающего устройства (компаратора);
- параметрами интегрирующих цепей, определяющих τ_3 и τ_p .

Достоинством схемы является повышенная устойчивость к помехам переменного тока с периодом, кратным T_1 . Это объясняется тем, что рассматриваемый АЦП преобразует не мгновенное, а среднее значение входного напряжения.

Погрешность преобразования АЦП с двойным интегрированием, как правило, не превышает 0,01 %.

В анализируемой схеме имеется возможность подавления периодических помех за счет выбора интервала интегрирования T_1 , равного или кратного периоду помехи, например периоду наиболее часто встречаемой помехи с частотой $f = 50$ Гц ($T = 20$ мс).

Положительная полуволна такой помехи сложившись с U_x вызывает ускоренное нарастание напряжения на выходе интегратора, а отрицательная полуволна вызывает замедление. Поскольку положительные и отрицательные полуволны симметричны, то результирующее напряжение определяется только U_x .

5.5. Генераторы электрических сигналов

Генераторы электрических сигналов, используемые при реализации СИ различного назначения, можно разделить на две группы:

- задающие генераторы, предназначенные для выработки высокостабильных электрических синусоидальных сигналов или сигналов сложной формы;
- релаксационные генераторы сигналов в основном импульсной и пилообразной формы, предназначенные для выполнения различных преобразовательных функций.

Задающие генераторы, используемые в измерительной технике, по схемной реализации подразделяются на RC -, LC -генераторы и генераторы на биениях.

RC -генераторы нашли наибольшее распространение в диапазоне до 300 кГц. Это объясняется возможностью получения напряжения синусоидальной формы с низким коэффициентом гармоник в указанном диапазоне частот при сравнительно простых схемно-конструктивных решениях.

Принципы построения и функционирования RC -генераторов детально анализируются в специальных курсах. Здесь рассмотрим лишь общие положения и особенности.

RC-генераторы обычно выполняют по схеме резистивно-емкостного усилителя, охваченного положительной частотно-зависимой и отрицательной частотно-независимой обратными связями.

Положительная обратная связь обеспечивает генерацию колебаний определенной частоты, а отрицательная — стабилизирует работу генератора во всем диапазоне генерируемых частот. Цепи положительной и отрицательной обратных связей обычно сбалансированы таким образом, что в замкнутом кольце устанавливается стационарный режим автоколебаний, минимальное значение которых не выходит за границу линейного участка вольтамперной характеристики усилителя.

Благодаря этому генерируемые колебания синусоидальной формы оказываются постоянными по амплитуде при перестройке частоты и имеют низкий уровень нелинейных искажений (до 1 %).

В качестве активных элементов в *RC*-генераторах используют операционные усилители.

Генераторы типа *LC* наибольшее применение находят на высоких частотах. Частота генерируемых колебаний определяется равенством

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}}, \quad (5.36)$$

где *C* — емкость в фарадах; *L* — индуктивность в генри; *Q* — добротность контура.

При высокой добротности контура

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5.37)$$

Следует отметить, что на низких частотах колебательная система таких генераторов оказывается громоздкой.

Высокая стабильность частоты генерируемых колебаний в *LC*-генераторах обеспечивается обычно за счет использования кварцевых резонаторов, параметрическими мерами (термокомпенсация, развязка питания и др.), термостатированием (помещением элементов схемы в объем с постоянным температурным режимом). При использовании всех указанных мер относительная нестабильность может быть снижена до 10^{-11} .

Заданная погрешность установки частоты обычно обеспечивается за счет качественного исполнения элементов настройки (подстроечные конденсаторы, катушки индуктивности).

Коэффициент гармоник, характеризующий форму генерируемого синусоидального сигнала, обычно составляет в *LC*-генераторах 1...2 %.

Схемно *LC*-генераторы обычно реализуют по трехточечной схеме, одно из сопротивлений которой образуется кварцевым резонатором.

Частота собственных колебаний кварца в измерительной технике выбирается обычно кратной десяти (100 кГц, 1 МГц, 5 МГц и др.).

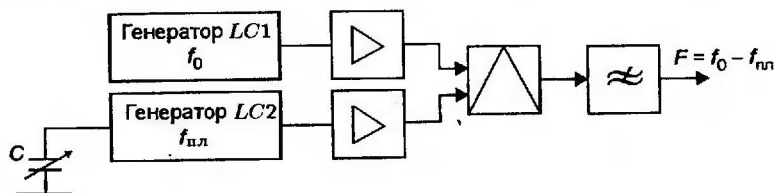


Рис. 5.20. Структурная схема генератора на биениях

В диапазоне частот от 300 до 3000 МГц и выше колебательная система выполняется с использованием отрезков коаксиальных или волноводных линий.

Генераторы на биениях, как и RC -генераторы нашли применение в низкочастотном диапазоне. Это объясняется в основном двумя достоинствами таких генераторов:

- высокой стабильностью колебаний по уровню, т.е. малой зависимостью выходного уровня сигнала от частоты;
- непрерывным перекрытием всего диапазона частот генерируемых колебаний без коммутации.

Основой структурного построения генераторов на биениях являются два высокочастотных маломощных генератора типа LC (рис. 5.20).

Один LC -генератор работает на фиксированной частоте f_0 , а второй имеет возможность плавно перестраиваться в диапазоне $f_{пл} = (f_0 - F) \dots f_0$, где F — верхняя граничная частота диапазона.

При подаче двух колебаний с разными частотами на входы преобразователя частоты на его выходе фильтром нижних частот выделяется сигнал разностной частоты $F = f_0 - f_{пл}$.

Например, в измерительном генераторе ГЗ-104 частота $F = 40$ кГц, тогда при $f_0 = 400$ кГц $f_{пл}$ изменяется в пределах 400...360 кГц. Диапазон частот генератора 0...40 кГц (0,02...40 кГц) перекрывается одним поворотом ротора конденсатора C (при этом емкость контура меняется всего на 20 %).

Генераторы пилообразного (линейно изменяющегося) напряжения (ГПН) широко используются в различных измерительных приборах. С их помощью, как отмечалось, осуществляются представление сигналов в реальном времени, спектральное разложение сигналов и другие функциональные преобразования.

Работу ГПН принято пояснять с помощью эквивалентной электро-механической схемы (рис. 5.21).

Принцип действия этой схемы состоит в формировании напряжения развертки на обкладках конденсатора путем его автоматического переключения с заряда на разряд и наоборот с помощью коммутирующего устройства. В соответствии с этой схемой в зависимости от соотношения между постоянной

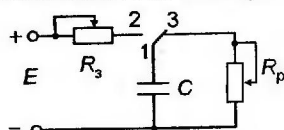


Рис. 5.21. Эквивалентная схема генератора пилообразного напряжения

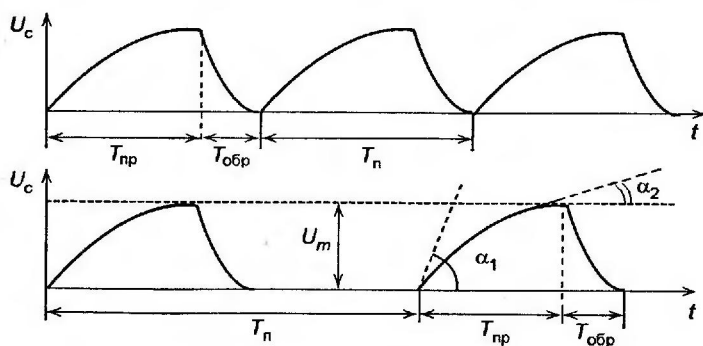


Рис. 5.22. Временная диаграмма пилообразного напряжения

величиной заряда конденсатора $\tau_3 = R_3 C$ и постоянной его разряда $\tau_p = R_p C$ линейное напряжение может быть получено как в процессе заряда, так и разряда. Кроме того, в зависимости от схемных решений ГПН линейное напряжение может быть нарастающим или падающим, положительным или отрицательным.

Пилообразное напряжение характеризуется следующими параметрами (рис. 5.22):

- длительностью прямого хода $t_{пр}$;
- длительностью обратного хода $t_{обр}$;
- размахом колебания U_m ;
- периодом повторения T_n ;
- коэффициентом нелинейности γ рабочего участка, который может быть определен относительным изменением крутизны на участке прямого хода:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1}.$$

Важнейшим требованием к ГПН является линейность пилообразного напряжения. Для линеаризации указанного напряжения распространение получили следующие способы:

- использование начального участка экспоненциальной кривой заряда конденсатора через сопротивление;
- заряд конденсатора через токостабилизирующее устройство;
- компенсация напряжения заряда конденсатора;
- применение интегрирующих звеньев.

В современных радиоэлектронных изделиях широко используют интегрирующие звенья на основе операционных усилителей (рис. 5.23).

Из известного уравнения интегрирующего звена [4]

$$\frac{dU_{\text{вых}}}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{\text{вх}}$$

для рассматриваемой схемы следует, что при большом значении ко-

эффициента усиления K и при $U_{вх} = E$ напряжение на выходе является линейной функцией времени:

$$U_{вых} \approx \frac{KE}{RC(K+1)} \approx \frac{E}{RC}t.$$

На основе интегрирующих операционных усилителей разработаны генераторы развертки с высокой линейностью.

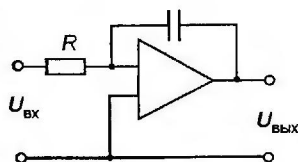


Рис. 5.23. Схема интегратора на операционных усилителях

5.6. Микропроцессоры

При построении современных электронных измерительных приборов и информационно-измерительных систем широко используют различные микропроцессоры (МП).

Микропроцессор — это программно-управляемое устройство обработки цифровой информации, конструктивно выполненное в виде одной или нескольких больших интегральных схем (БИС).

Один из возможных вариантов структурного построения однократного (с фиксированной разрядностью и определенной системой команд) универсального микропроцессора представлен на рис. 5.24 [38]. Основные элементы системы: устройство управления (УУ), арифметико-логическое устройство (АЛУ), блок внутренних регистров (БВР). Связь между узлами МП осуществляется с помощью внутренней шины данных.

АЛУ микропроцессора выполняет несколько простейших операций: сложение, вычитание, логическое умножение (И), логическое сложение (ИЛИ), сложение по модулю 2, сдвиг, пересылку и др.

Наличие в МП блока внутренних регистров расширяет возможности АЛУ. Регистром называется электронная схема для временного хранения двоичной информации. Такую схему строят на триггерах, общее число которых определяется разрядностью регистра.

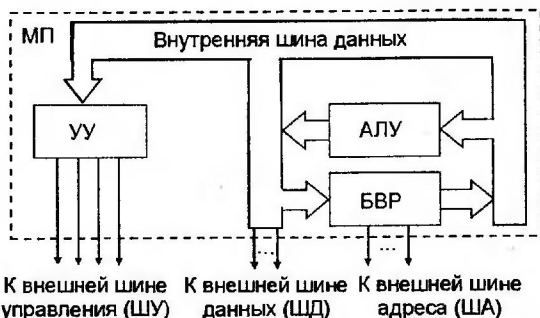


Рис. 5.24. Типовая структурная схема микропроцессора

Микропроцессоры содержат различное количество разнообразных регистров: регистры общего назначения (РОН), команд, адреса, счетчики команд, регистры состояния, прямого доступа к памяти и др.

С помощью устройств управления организуется взаимодействие АЛУ и БВР в процессе выполнения команд. Функция управления может осуществляться или с применением аппаратных средств или путем микропрограммирования.

Основные узлы МП соединены между собой и с внешними устройствами с помощью шин. Шиной называется группа линий передачи информации, объединенных общим функциональным признаком. В МП используются одна-три внутренних шины. Увеличение числа шин приводит к увеличению быстродействия, однако функциональные возможности МП снижаются, так как часть площади кристалла занимает шинами. По внешним шинам МП передаются данные, управляющие сигналы и адреса.

Наряду с отдельными микропроцессорами при построении измерительных приборов используют так называемые микропроцессорные комплекты (наборы) интегральных микросхем (МПК ИС). МПК ИС — это совокупность микропроцессорных и других интегральных микросхем, предназначенных для совместного использования. ИС в составе МПК имеют обычно информационную, энергетическую и конструктивную совместимости. В МПК входят следующие БИС: микропроцессор (базовый комплект); запоминающие устройства; БИС ввода-вывода информации; БИС управления.

Возможное сочетание цифровых устройств, используемых в автономных ЦИП для обработки измерительной информации, представлено на рис. 5.25, где показаны три разновидности средств на основе МП: собственно МП, МП-модуль и микроЭВМ.

На рассматриваемой схеме представлен МП, состоящий из АЛУ, внутреннего регистра, устройства управления и устройства сопряжения перечисленных устройств между собой и внешней аппаратурой (интерфейса).

МП-модуль, показанный на рисунке, содержит собственно МП, запоминающие устройства ЗУ, генератор тактовых импульсов ГТИ и интерфейс внешних устройств. Конструктивно МП-модуль изготавливается обычно в виде одной платы. В составе МП-системы МП-модуль совместно с устройствами ввода-вывода УВВ, комплектом программного обеспечения (КПО) и пультом управления при наличии источника питания (ИП) может выполнять функции микроЭВМ.

Программирование для МП может проводиться на машинном языке, на языке типа ассемблера или на языке высокого уровня. Программа вводится в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) МП изготовителем, и содержание ПЗУ нельзя стереть. Кроме ПЗУ в МП используются программируемые постоянные запоминающие устройства (ППЗУ), которые позволяют вводить программу пользователям с помощью специального устройства — программатора, но после введения программы ее

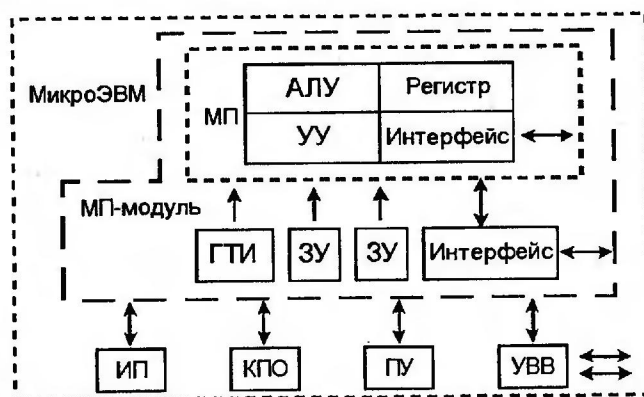


Рис. 5.25. Структура построения микроЭВМ на основе микропроцессора и МП-модуля

уже нельзя менять. Более широкими возможностями обладают репрограммируемые постоянные запоминающие устройства (РПЗУ) — они допускают многократное перепрограммирование.

В настоящее время применение МП в измерительных приборах и измерительных системах достаточно разнообразно. Основные задачи, выполняемые МП в измерительных приборах и системах: многофункциональность измерительных приборов; упрощение управления процессом измерения; автоматизация регулировок; самокалибровка и автоматическая поверка; улучшение метрологических характеристик прибора; выполнение вычислительных процедур; статистическая обработка результатов наблюдений; создание программируемых, полностью автоматизированных приборов и др.

Наиболее широкое применение МП получили в следующих типах приборов, используемых для измерения электрических величин: вольтметрах, омметрах, мультиметрах, мостах и компенсаторах переменного тока, осциллографах, регистраторах и др.

При выборе МП для использования в измерительных приборах учитываются следующие их характеристики: разрядность, емкость адресуемой памяти, принцип управления, быстродействие, потребляемая мощность, питающее напряжение, конструктивные данные, условия эксплуатации.

Применение МП в измерительной технике следует рассматривать как одно из основных направлений развития отечественного приборостроения.

5.7. Коды и системы счисления

В цифровых измерительных приборах дискретные значения измерительных сигналов могут быть представлены для последующей обработки в виде кодовых комбинаций. Рассмотрим некоторые коды.

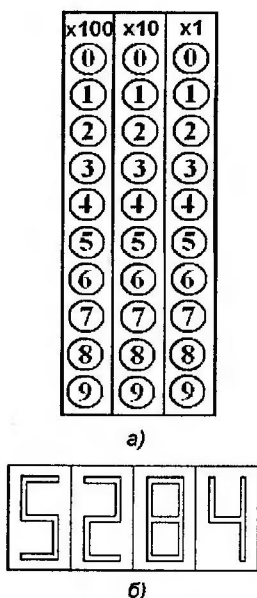


Рис. 5.26. Индикация цифр в десятичной системе счисления: а — позиционно-десятичная система; б — цифровая десятичная система

знаков.

Индикация цифр в десятичной системе счисления может быть осуществлена в позиционно-десятичной системе, т.е. когда каждая цифра одной декады появляется в определенном месте индикаторной панели (рис. 5.26, а), или в цифровой десятичной системе, т.е. когда каждая цифра одной десятичной декады появляется в одном и том же месте (рис. 5.26, б).

В двоичном коде для представления цифр разряда используют два символа: 0 и 1 ($b = 2$; $a_i = 0; 1$). Для перевода числа из десятичной системы в двоичную необходимо провести вычислительную процедуру. Например: число

$$27,25 = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} = 11011,01.$$

Из приведенного примера видно, что в двоичной системе весовой коэффициент старшего разряда превышает весовой коэффициент младшего разряда в два раза, т.е. они образуют ряд 1, 2, 4, 8, 16, 32 и т.д.

Двоичная система счисления является предпочтительной по сравнению с десятичной для проведения промежуточных операций в цифровом приборе, так как элементная электронная база с двумя устойчивыми состояниями проста и помехоустойчива. Вместе с тем двоичная система

Унитарный код (число-импульсный) имеет число импульсов, пропорциональное квантованному значению измеряемой величины. Унитарный код — это непозиционный код. Такой код громоздкий.

Более компактными являются позиционные коды (системы): десятичный, двоичный, двоично-десятичный.

В позиционной системе любое число может быть представлено в виде

$$N_b = \sum_{i=-m}^n a_i b^i, \quad (5.40)$$

где b — основание системы счисления (для десятичной — 10, для двоичной — 2); $i = -m, \dots, n$ — номер разряда (позиции); a_i — разрядные коэффициенты (в каждом разряде от 0 до $b-1$); b^i — весовые коэффициенты i -го разряда.

Десятичный код используется в ЦИП для отображения результата измерения. В соответствии с (5.40), например, число 4716 в десятичной системе будет представлено в виде

$$N_{10} = 4716 = 4 \cdot 10^3 + 7 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 6 \cdot 10^0.$$

В унитарном коде потребовалось бы 4716

Таблица 5.2

Таблица соответствия десятичных и двоичных чисел

Десятичное число	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Двоичное число	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010

неудобна для визуального отсчета и вызывает определенные технические сложности при переводе в десятичное число. Предпочтительным в смысле указанных особенностей является двоично-десятичный код.

Двоично-десятичный код образуется путем представления каждой цифры десятичного разряда с помощью 4-разрядного двоичного числа.

Так как число возможных цифр в каждом разряде десятичного числа равно 10 (0, 1, 2, ..., 9), для представления каждой десятичной цифры требуется четыре символа. При этом шесть комбинаций являются излишними ($2^4 = 16$). Исходя из имеющейся избыточности возможных 4-символьных комбинаций находят применение несколько разновидностей двоично-десятичных кодов.

Один из возможных двоично-десятичных кодов получается при использовании первых четырех степеней основания 2: $2^0 = 1$, $2^1 = 2$, $2^2 = 4$, $2^3 = 8$; он называется кодом 8-4-2-1. Таким образом, каждый разряд этого кода имеет постоянный вес, и наличие в данном разряде 1 обеспечивает использование постоянного слагаемого (табл. 5.2).

Для технической реализации процедуры преобразования двоичного кода в двоично-десятичный используется двоично-десятичный счетчик, в котором каждые четыре последовательно включенные триггеры охвачены такими обратными связями, при которых осуществляется счет не до $2^4 = 16$, а до 10.

В зависимости от способа передачи коды делятся на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные. При параллельном коде все разряды передаются одновременно, каждый по своей цепи. При последовательном коде все его разряды передаются последовательно во времени по одной цепи. При последовательно-параллельном коде все символы одной комбинации передаются одновременно по параллельным цепям, а комбинации последовательно во времени.

5.8. Цифровые индикаторы

В настоящее время известно большое количество цифровых индикаторов, отличающихся используемым физическим явлением свечения и способом получения десятичного знака (цифры).

По способу получения знака различают сегментные, мозаичные и электродные индикаторы.

Сегментные индикаторы (рис. 5.27, а) имеют обычно семи- или десятисегментную конструкцию (минимум семь сегментов). Принцип подсветки (высвечивания) каждого сегмента определяется используемым в

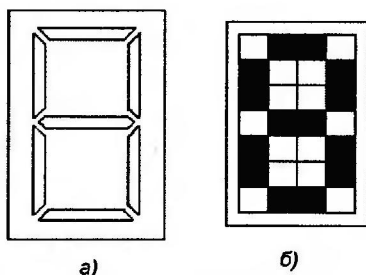


Рис. 5.27. Цифровые индикаторы: а — сегментные; б — мозаичные

индикаторе физическим явлением. В современных индикаторах измерительных приборов это могут быть электрооптический эффект в твердом теле, в жидких кристаллах, катодолюминесцентные и др.

Мозаичные индикаторы (рис. 5.27, б) содержат мозаику подсвечиваемых ячеек. Каждая ячейка может быть реализована на основе светодиодов, на жидких кристаллах или иным методом.

В **электродных индикаторах** отображающими цифрами являются цифры, выполненные конструктивно из металлической сетки, которые располагаются в баллоне с инертным газом.

В зависимости от используемого физического явления различают следующие используемые на практике индикаторы: газоразрядные, на светоизлучающих диодах, на жидких кристаллах.

Газоразрядные индикаторы. Конструктивно газоразрядные индикаторы выполнены в виде стеклянного баллона, наполненного инертным газом (неоном). Внутри баллона имеется несколько (десять) катодов, выполненные из тонкой металлической сетки в форме цифр (0, 1, ..., 9) и расположенных пакетом один над другим. Роль анода выполняет сетка, охватывающая пакет катодов. Если между анодом и одним из катодов приложено достаточное напряжение, (150...200 В), то вокруг катода возникает оранжево-красное свечение (тлеющий разряд), имеющее форму цифры. Из изложенного следует, что по способу получения знака газоразрядные индикаторы — это электродные индикаторы. Достоинство газоразрядных индикаторов — контрастное изображение цифр. Основной недостаток — высокое напряжение зажигания.

Индикаторы на светоизлучающих диодах относятся к классу электролюминесцентных индикаторов. Кроме электролюминесцентных индикаторов, на светоизлучающих диодах применяют также люминоформные и катодолюминесцентные индикаторы.

Индикаторные ячейки на светоизлучающих диодах представляют собой р-п-переходы из карбида кремния (или фосфида гелия). При пропускании тока в прямом направлении в процессе рекомбинации неосновных носителей выделяется энергия в виде фотонов, т.е. излучается свет. Свечение может быть желтым, красным, зеленым. По способу получения знака индикаторы на светоизлучающих диодах реализу-

ют обычно по сегментному или мозаичному вариантам. Достоинства: низкое напряжение, высокая яркость. Недостаток — большая удельная мощность (до 8 мВт/мм²).

Индикаторы на жидких кристаллах. Жидкокристаллическое состояние — это промежуточное состояние (мезоморфное) между твердым кристаллом и жидкостью. Принцип действия рассматриваемых индикаторов основан на изменении оптических свойств жидких кристаллов под воздействием электрического поля. Такие индикаторы работают в отраженном свете, они сами свет не излучают, т.е. являются пассивными.

Жидкий кристалл (ЖК) в индикаторах размещается между двумя стеклянными пластинами в зазоре примерно 10 мкм. Пластины покрыты электропроводящей пленкой, образующей электроды. При подаче на электроды переменного напряжения изменяются показатель преломления или коэффициент поляризации (в зависимости от вещества). Характеристики индикаторов на ЖК совместимы с выходными характеристиками низковольтных маломощных транзисторов интегральных микросхем (так рабочее напряжение для ЖК может быть выбрано начиная с 2,3 В), что является одним из главных достоинств таких индикаторов. Второе достоинство — малая потребляемая мощность. В отличие от всех других индикаторов в ЖК индикаторах, чем выше внешняя освещенность, тем больше яркостный контраст. Недостатки: значительная инерционность (до 0,5 с); ограниченный диапазон рабочих температур.

Индикаторные элементы на жидких кристаллах реализуют обычно в сегментном исполнении.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите масштабные измерительные преобразователи, используемые в измерительной технике.
2. Для чего предназначены шунты и добавочные резисторы?
3. Запишите аналитическое выражение для определения величины сопротивления шунта и добавочного резистора.
4. Назовите назначение основных элементов структурной схемы электромагнитного измерительного механизма.
5. Каковы достоинства и недостатки магнитоэлектрического измерительного механизма?
6. Перечислите преобразователи значений величин, используемых в измерительных приборах.
7. Изобразите обобщенную структурную схему аналого-цифрового преобразователя.
8. Назовите достоинства аналого-цифрового преобразователя с двойным интегрированием.
9. Назовите методы линеаризации пилообразного напряжения.
10. Какие позиционные коды используют в цифровых измерительных приборах?
11. Сделайте классификацию цифровых индикаторов, используемых в цифровых измерительных приборах.

Глава 6

Измерительные генераторы сигналов

6.1. Назначение, классификация и основные характеристики измерительных генераторов

В практике эксплуатации радиоэлектронных устройств часто возникает необходимость исследовать реакцию какого-либо устройства при воздействии на его вход сигнала, имеющего заданные характеристики. В качестве источников таких сигналов используют измерительные генераторы (ИГ).

В общем случае измерительный генератор представляет собой источник электрических сигналов заданной формы, частоту и амплитуду которых можно изменять в широких пределах и отсчитывать с заданной точностью.

От обычных генераторов измерительные генераторы отличаются рядом дополнительных возможностей:

- возможностью совместной работы с другими электронными средствами;
- возможностью точной установки и регулировки в широких пределах выходных параметров;
- возможностью контролировать параметры выходных сигналов с помощью измерительных устройств.

Совокупность метрологических характеристик генераторов принято разделять на три группы: частотные характеристики, характеристики выходного уровня сигнала и характеристики формы сигнала.

Таковыми характеристиками являются:

- абсолютное или относительное изменение частоты при изменении внешних условий за определенное время, т.е. нестабильность частоты. Нестабильность на интервале времени в пределах одного часа принято называть кратковременной, а на большем интервале (1 сутки, 15 суток, 30 суток) — долговременной;
- погрешность установки частоты (длительности) сигнала;
- нестабильность выходного уровня;
- погрешность установки выходного уровня;

- коэффициент гармоник для синусоидальных сигналов или погрешность воспроизведения заданных коэффициентов амплитуды и формы для несинусоидальных сигналов.

Метрологические характеристики принято определять через классы точности. Обозначение класса точности состоит из условных обозначений основных параметров и численного значения предела допустимой основной погрешности по параметру (табл. 6.1).

Кроме метрологических характеристик, генераторы оценивают следующими эксплуатационными характеристиками.

1. Диапазон перекрываемых частот ($f_{\min} \dots f_{\max}$) — это частотный интервал, в котором сигнал соответствует нормам по точности, установленным для данного генератора.

Диапазон перекрываемых частот часто оценивается коэффициентом перекрытия по частоте

$$\eta = f_{\max}/f_{\min},$$

где $f_{\max}$ — наибольшая номинальная частота диапазона; $f_{\min}$ — наименьшая номинальная частота диапазона.

2. Пределы регулировки напряжения выходного сигнала ($U_{\min} \dots U_{\max}$) или мощности ($P_{\min} \dots P_{\max}$).

Пределы регулировки принято также представлять в виде диапазона регулировки напряжения или мощности, выражаемого в децибелах (дБ):

$$A \geq 20 \lg(U_{\max}/U_{\min}),$$

$$A \geq 10 \lg(P_{\max}/P_{\min}).$$

3. Выходное сопротивление генератора. В реальных измерительных генераторах выходное сопротивление имеет несколько позиций, например: 600, 135, 75, 50, 5 Ом. Это необходимо для согласования выходного сопротивления с нагрузкой, так как согласованный режим является наиболее желательным, ибо в этом случае (при $R_n = R_r$) в нагрузку отдается максимальная мощность от генератора.

4. Диапазон регулировки параметров модуляции:

- коэффициента амплитудной модуляции M при амплитудной модуляции;
- девиации частоты Δf в режиме частотной модуляции;
- длительности импульса $t_{\text{и}}$ в режиме амплитудно-импульсной модуляции и т.п.

5. Качество экранировки генератора. Для оценки качества устранения или значительного ослабления непредусмотренных излучений электромагнитной энергии, которая может создавать помехи и искажать результаты измерений и др.

В соответствии с государственным стандартом ГОСТ 15094-86 и сложившейся системой взглядов в научной и справочной литературе по данному вопросу ИГ можно классифицировать по ряду признаков. Вариант классификации по основным признакам приведен в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Классификация измерительных генераторов

Классификационный признак	Тип измерительного генератора
По назначению	Общего применения (ГЗ, Г4, Г5, Г6); генераторы испытательных сигналов (Г9); специальные ИГ (Ч1); генераторы цифровых сигналов (Г5); синтезаторы частоты (Г7)
По диапазону частот	Низкой частоты (НЧ); высокой частоты (ВЧ); сверхвысокой частоты (СВЧ); оптические генераторы (ОГ)
По форме сигналов	Синусоидальных сигналов (ГЗ, Г4, Г7); импульсных сигналов (Г5); сигналов специальной формы (Г6)
По виду модуляции	Амплитудная (АМ); частотная (FM); амплитудно-импульсная (АТ); частотно-импульсная (FT); фазо-импульсная (φT); однополосная (SM)
По допустимым значениям основной погрешности	По частоте (F_n); по уровню выходного сигнала (U_n); по коэффициенту модуляции (M_n). Например, $F_1 U_5 A M_{10}$: по частоте 1 %; по уровню 5 %; по коэффициенту АМ 10 %
По используемой элементной базе	Аналоговые; цифровые

Под специальными ИГ принято понимать генераторы синусоидальных сигналов в диапазоне от десятков Гц до единиц ГГц, обеспечивающие выдачу напряжения (мощности) на стандартные нагрузки. В телекоммуникационных системах такими нагрузками обычно являются 75, 135, 150 и 600 Ом. К специальным ИГ относятся также высокостабильные квантовые генераторы (водородные, рубидиевые, цезиевые), являющиеся основой квантовых стандартов частоты и времени.

Синтезаторы частоты — это генераторы синусоидальных сигналов с высокой стабильностью частоты и дискретной ее установкой. Стабильность синтезаторов обычно равна стабильности частоты ЗГ с кварцевой стабилизацией. Дискретность установки частоты может достигать сотых долей герца. Синтезаторы частоты используют для определения нестабильности радиостанций, калибровки шкал генераторов и частотомеров, в качестве возбудителей радиопередатчиков и гетеродинов радиоприемников.

Генераторы испытательных сигналов — это генераторы, вырабатывающие калибровочные импульсные сигналы. Они используются для исследования широкополосных радиоэлектронных устройств общего и специального назначения, совмещая в себе обычно калибраторы напряжения и временных интервалов. Такие генераторы используют для проверки и калибровки электронных осциллографов.

Генераторы цифровых сигналов обеспечивают формирование импульсных двухуровневых сигналов для испытания логических радиоэлектронных устройств. Например, генераторы псевдослучайных последовательностей (Т2), генераторы кодовых комбинаций (Т3). Такие генераторы называют также генераторами со сложным видом выходной последовательности импульсов.

Принцип структурного построения и функционирования некоторых типов измерительных генераторов рассмотрим более подробно.

6.2. Измерительные генераторы сигналов низкой частоты (ГЗ)

Измерительные генераторы низкой частоты (ГНЧ) условно разделяют на генераторы инфранизких и низких (звуковых и ультразвуковых) частот.

Измерительные генераторы инфранизких частот обычно вырабатывают сигнал гармонической формы в диапазоне от 0,01 Гц до 20 Гц. Верхняя граница частот у отдельных генераторов достигает десятков и даже сотен килогерц. Эти генераторы используют в основном для исследования и настройки систем автоматического регулирования.

Генераторы низких звуковых и низких ультразвуковых частот охватывают диапазон 20 Гц...20 (40) кГц и 20 кГц...200 (300) кГц соответственно. Указанные генераторы широко используют при испытаниях и настройке узлов радиозлектронной аппаратуры, для модуляции сигналов высокочастотных измерительных генераторов, градуировки измерительных приборов и т.п.

Обобщенная структурная схема низкочастотного измерительного генератора (типа ГЗ), выходным сигналом которого является немодулированный синусоидальный сигнал, показана на рис. 6.1.

Основным узлом низкочастотного измерительного генератора является задающий генератор ЗГ, который вырабатывает сигнал синусоидальной формы низкой частоты. В качестве задающих используют известные *RC*-генераторы, генераторы, работающие по методу биений, а также *LC*-генераторы (см. гл. 5).

Усилитель, включенный после задающего генератора, обеспечивает усиление напряжения и мощности генерируемых синусоидальных колебаний. К тому же он развязывает задающий генератор от нагрузки.

Измеритель напряжения включается перед выходным устройством. Напряжение на выходе генератора определяется по показанию вольтметра, умноженному на коэффициент, отсчитываемый по шкале аттенюатора выходного устройства.

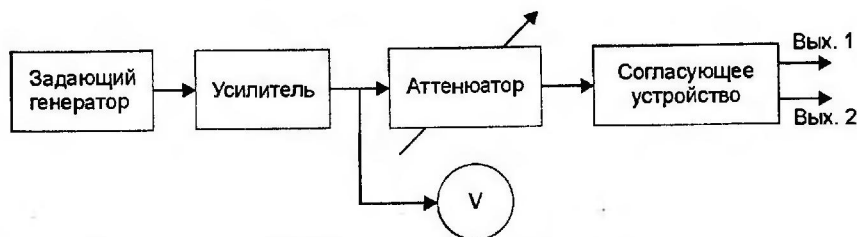


Рис. 6.1. Структурная схема низкочастотного измерительного генератора

Аттенюатор обеспечивает контролируемое ослабление сигнала, поступающего от усилителя. Он собирается обычно из Т- или П-образных звеньев на резисторах. Особенностью аттенюаторов является независимость входного и выходного сопротивлений от частоты.

Градуировка аттенюаторов проводится обычно в условиях, соответствующих предельному значению шкалы измерительного прибора и при включенной стандартной нагрузке.

В качестве согласующих устройств в ИГ используют согласующие трансформаторы. Они обеспечивают согласование выходного сопротивления ИГ с сопротивлением нагрузки. Поскольку практически сложно создать согласующий трансформатор с равномерной АЧХ в диапазоне от 20 Гц до 300 кГц, обычно используют два трансформатора: один — в полосе 20 Гц...20 кГц, второй — в полосе 20 кГц...200 (300) кГц.

Выходные зажимы согласующего трансформатора позволяют получать как симметричные, так и несимметричные выходные сигналы, а также два одинаковых по амплитуде и противоположных по фазе выходных напряжения.

Многие ИГ не имеют согласующих трансформаторов. Они рассчитаны на нагрузку 600 Ом.

Если стандартная нагрузка 600 Ом, но ИГ используется на нагрузку значительно больше чем 600 Ом, то для этого случая в некоторых генераторах предусматривается включение параллельно нагрузке резистора $R = 600$ Ом, входящего в состав схемы генератора. В этом случае ИГ отдает в нагрузку максимальную мощность.

Наряду с рассмотренными низкочастотными аналоговыми генераторами все большее распространение получают цифровые измерительные генераторы низкой частоты.

Работа цифровых ИГ основана на принципах формирования числового кода с последующим его преобразованием с помощью ЦАП и фильтра в аналоговый гармонический сигнал.

Цифровые низкочастотные ИГ характеризуются высокими метрологическими характеристиками, удобством эксплуатации, наглядностью индикации, хорошей возможностью перестройки по заданной программе, хорошим взаимодействием с цифровыми средствами обработки информации.

6.3. Измерительные генераторы высокой и сверхвысокой частоты (Г4)

Измерительные генераторы высокой частоты (ИГ ВЧ) предназначены для генерации немодулированных или модулированных синусоидальных измерительных сигналов в диапазоне частот от 300 кГц до 300 МГц.

Принято выделять две группы таких генераторов:

- ИГВЧ радиовещательного диапазона, работающие в диапазоне до 50 МГц;

- ИГВЧ метрового диапазона (очень высоких частот, ОВЧ), работающие в диапазоне до 300 МГц (ГЧ-107).

Измерительные генераторы сверхвысоких частот (ИГ СВЧ) работают в диапазоне (300 МГц...30 ГГц).

Измерительные генераторы радиовещательного диапазона применяют в основном для настройки радиовещательных приемников и для измерений характеристик четырехполюсников.

Принцип работы типового ИГ ВЧ радиовещательного диапазона рассмотрим на примере генератора Г4-102 А. Структурная схема такого генератора приведена на рис. 6.2 [25]. Генератор работает в двух режимах: непрерывная генерация и амплитудная модуляция (внутренняя и внешняя).

Основным узлом генератора является задающий *LC*-генератор. Диапазон генерируемых частот разбивается на ряд поддиапазонов, устанавливаемых подключением соответствующих катушек индуктивности. Изменение частоты в пределах поддиапазона осуществляется с помощью конденсатора переменной емкости.

Амплитудная модуляция осуществляется в модуляторе М, представляющем собой широкополосный усилитель с нелинейным коэффициентом передачи.

После модулятора высокочастотный сигнал поступает на вход широкополосного усилителя Ус.2, охваченного цепью автоматической регулировки уровня АРУ. В цепь АРУ входят выпрямительный преобразователь ВП2, дифференциальный усилитель постоянного тока ДУ и регулятор опорного напряжения РОН. На вход 1 ДУ поступает постоянное напряжение, пропорциональное среднему значению выходного сигнала, а на вход 2 — опорное напряжение. Разность этих напряжений является управляющим сигналом, воздействующим на модулятор так, что его коэффициент передачи изменяется и разность напряжений стремится к нулю.

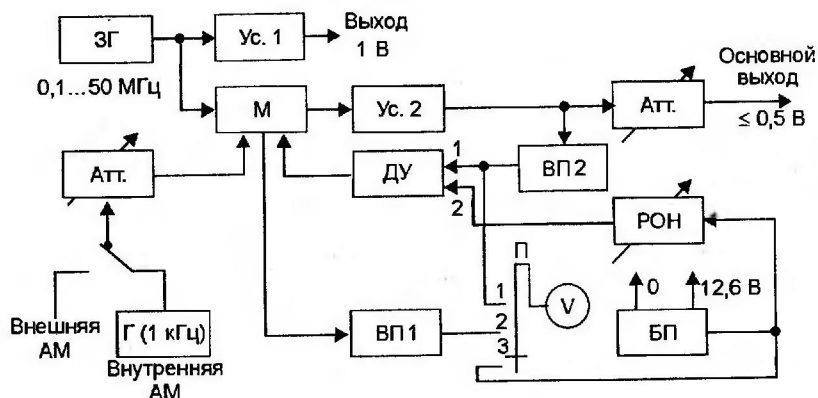


Рис. 6.2. Структурная схема измерительного генератора радиовещательного диапазона

Уровень сигнала на основном выходе можно изменять в пределах 0,5 мкВ...0,5 В, для чего предусмотрен ступенчатый резистивный аттенуатор на П-образных звеньях.

Уровень выходного сигнала усилителя Ус2 контролируется вольтметром через переключатель П в положении 1; в положении 3 можно контролировать напряжение блока питания БП. В генераторах высокой частоты предусматривается вспомогательный выход через широкополосный усилитель Ус1. На выходе имеется сигнал 1 В, который используется для точного измерения частоты внешним частотомером и других целей.

Измерительные генераторы метрового диапазона (ОВЧ) предназначены для настройки, контроля и испытаний аппаратуры ЧМ-вещания, радиосредств с частотной модуляцией и телевизионной аппаратуры. В таких генераторах применяются несколько видов модуляции и манипуляции.

Для формирования диапазона частот в рассматриваемых устройствах применяют задающие генераторы, работающие, как правило, на частотах верхнего поддиапазона и использующие для перекрытия всего диапазона принцип деления частоты. Для этой цели применяется цепочка делителей частоты с соответствующими фильтрами (рис. 6.3).

Верхний диапазон, как правило, легко перекрывается с помощью конденсатора переменной емкости. Переход к следующему поддиапазону осуществляется включением соответствующего числа делителей частоты, каждый из которых делит частоту на два. Выходные сигналы делителей несинусоидальны, поэтому после каждого из них включены полосовые фильтры.

Различные виды модуляции генерируемых сигналов реализуются, как правило, в различных узлах схемы. В рассматриваемом генераторе частотная модуляция осуществляется в ЗГ (к колебательному контуру подключается варикап), импульсная модуляция происходит в выходном усилителе, а амплитудная модуляция — в модуляторе.

Как правило, имеется вспомогательный выход немодулированного сигнала через усилитель.

Измерительные генераторы сверхвысоких частот (ИГ СВЧ) предназначены для исследований, настройки и испытаний аппаратуры ра-

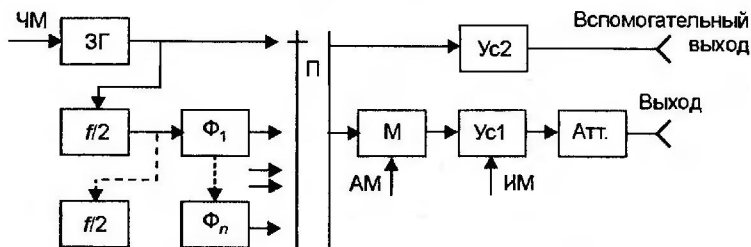


Рис. 6.3. Обобщенная структурная схема генератора метрового диапазона

диорелейной, тропосферной и космической связи с различными видами модуляции.

В зависимости от типа выходного разъема ИГ СВЧ подразделяют на генераторы с коаксиальным и волноводным выходом.

Структурная схема ИГ СВЧ содержит следующие основные узлы: задающий генератор ЗГ, модуляционный блок МБ, attenuator Атт, согласующее устройство СУ (рис. 6.4).

Задающий генератор выполняют обычно на отрицательном клистроне с внешним или внутренним объемным резонатором. Частота генерируемых колебаний определяется геометрической формой, размерами и материалом резонатора, а перестройка частоты осуществляется за счет изменения геометрических размеров резонаторов путем перемещения внутри него замыкающих перемычек или упругой деформации самого резонатора.

ИГ СВЧ на отрицательных клистродах имеют достаточно громоздкую конструкцию. В настоящее время находят распространение генераторы СВЧ на диодах Ганна. Они отличаются простотой конструкции, высокой надежностью, малыми габаритами.

Диод Ганна при определенном напряжении питания представляет собой отрицательное сопротивление, что приводит к возбуждению в подключенном к диоду объемном резонаторе СВЧ-колебаний. Эквивалентная емкость диода Ганна изменяется в соответствии с приложенным к нему напряжением, что используется для перестройки частоты и для частотной модуляции.

Задающие СВЧ генераторы могут выполняться также на магнитронах, лавинно-пролетных диодах (ЛПД), лампах обратной волны (ЛОВ), СВЧ-транзисторах.

Стабильность частоты ИГ СВЧ определяется стабильностью параметров объемных резонаторов, а также электрическим и температурным режимом активных элементов.

В диапазоне СВЧ используют различные виды модуляции. Как правило, амплитудная модуляция осуществляется синусоидальным или импульсным сигналом, а модуляция по частоте — синусоидальным и пилообразными сигналами. Источник внутренней модуляции образуется в модуляционном блоке МБ. Сигналы внешней модуляции подаются также через МБ или непосредственно к модулятору. Заметим, что модуляция несущей путем изменения режима работы задающего генератора обычно связана с появлением паразитной модуляции. Например, амплитудная модуляция приводит к паразитной частотной, поэтому в современных ИГ СВЧ амплитудную модуляцию осуществляют на выходе прибора.

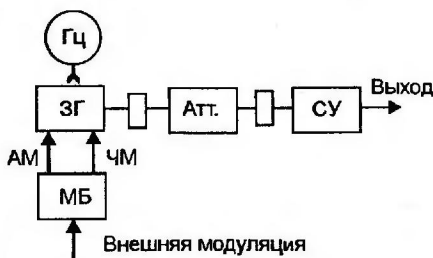


Рис. 6.4. Обобщенная структурная схема измерительного генератора СВЧ

Мощность генерируемых СВЧ-колебаний регулируется аттенуатором СВЧ, в котором обычно используется явление затухания сигнала в так называемом предельном волноводе. В качестве аттенуатора СВЧ используют также полупроводниковые $p-i-n$ -диоды, в которых под действием управляющего тока мощность СВЧ сигнала шунтируется пропорционально значению управляющего тока.

Выходное сопротивление генератора согласуется с нагрузкой с помощью согласующего устройства СУ, в качестве которого обычно используют ферритовый вентиль.

Измерители мощности и частоты подключают к ИГ СВЧ через СВЧ-разъемы. В СВЧ-диапазоне уровень выходного сигнала оценивают именно по мощности, а не по напряжению или току, так как мощность является величиной постоянной в любом сечении тракта СВЧ и поэтому позволяет оценить уровень сигнала более точно. Измеритель мощности обычно состоит из термисторной головки и электронного вольтметра. Выпускаемые промышленностью ИГ СВЧ развивают выходную мощность в пределах 200 мВт.

6.4. Измерительные генераторы импульсов

Измерительные генераторы импульсных сигналов (ИГИС) являются источниками видеоимпульсов различной формы, длительности, частоты следования и амплитуды.

Широкое применение находят генераторы импульсных сигналов прямоугольной формы (Г5). В зависимости от характера последовательности генерируемых импульсов такие генераторы разделяют на три группы: генераторы одинарных импульсов общего применения; генераторы парных импульсов; генераторы кодовых групп и псевдослучайных последовательностей.

Последовательность прямоугольных импульсов ИГИС принято характеризовать следующими параметрами:

- длительностью импульса τ ;
- высотой импульса (амплитудой) A ;
- частотой f (периодом T) повторения импульсов или пар импульсов (у генераторов парных импульсов);
- временным сдвигом основного импульса относительно синхроимпульса;
- временным сдвигом импульсов второго и последующих каналов относительно импульсов первого канала (если число каналов более одного);
- временным сдвигом второго импульса пары относительно первого (у генераторов парных импульсов).
- длительностью фронта τ_{Φ} (соответствует времени нарастания импульса от 0,1 до 0,9 A);

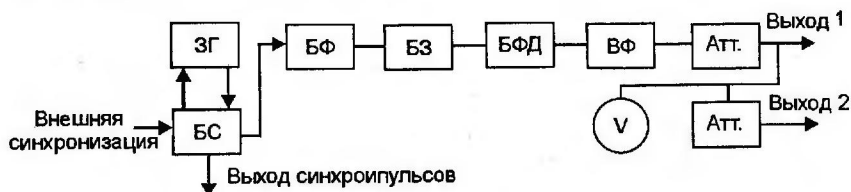


Рис. 6.5. Типовая структурная схема генератора импульсов

- длительностью спада τ_c (соответствует времени убывания сигнала от 0,9 до 0,1 А).

Большинство генераторов прямоугольных импульсов строят по типовой структурной схеме, в которой осуществляется последовательное формирование параметров импульсов (рис. 6.5).

Задающий генератор ЗГ вырабатывает синусоидальное, или импульсное напряжение, которое в целом определяет частоту повторения последовательности выходных импульсов. В первом случае ЗГ выполняется по схеме RC - или LC -генератора, а во втором — по одной из схем релаксационных генераторов.

В дальнейшем напряжение с выхода ЗГ в блоке синхронизации БС преобразуется в последовательность коротких импульсов, с помощью которых запускается блок формирования импульсов БФ.

Эти же короткие импульсы обычно используют в качестве синхроимпульсов для внешних устройств (осциллограф и др.). Через БС осуществляется обычно и синхронизация задающего генератора от внешнего источника.

С помощью блока задержки БЗ можно сдвигать начальное положение импульсов на выходе генератора, а в блоке формирования длительности БФД устанавливать нужную длительность импульса τ . В выходном формирователе ВФ устанавливается необходимое значение амплитуды и полярности. С помощью аттенюатора Атт на втором выходе устанавливаются импульсы с амплитудой в 10^n раз ($n = 1, 2, 3, 4$) меньшей, чем на первом выходе. Контроль амплитуды импульсов осуществляется пиковым вольтметром.

6.5. Измерительные генераторы шумовых сигналов (Г2)

Измерительные генераторы шумовых сигналов (ИГШС) вырабатывают шумовые измерительные радиотехнические сигналы с нормированными статистическими характеристиками.

Шумовым сигналом называется совокупность одновременно существующих электрических колебаний, частоты и амплитуды которых носят случайный характер. Типичным примером шумового сигнала являются электрические флуктуации. В изменении мгновенных значений

этих флуктуационных напряжений, как правило, невозможно проследить какую-либо закономерность, но в то же время такие сигналы обладают определенными вероятностными характеристиками (закон распределения мгновенных значений, среднеквадратическое значение напряжений и др.).

ИГШС применяют при оценке качества функционирования, технического состояния и для измерения параметров различных объектов. При этом ИГШС могут использоваться:

- в качестве источников флуктуационных помех при исследовании предельной чувствительности радиоприемных и усилительных устройств;
- в качестве имитаторов полного сигнала многоканальной аппаратуры связи;
- для измерения коэффициента шума и исследования помехоустойчивости различных радиоэлектронных систем и их узлов.

По диапазону генерируемых частот генераторы шума делят на низкочастотные (20 Гц...20 кГц и 15 Гц...6,5 кГц); высокочастотные (1...600 МГц); сверхвысокочастотные (500 МГц...12 ГГц).

К источнику шума предъявляют следующие основные требования:

- равномерность спектральной плотности мощности в заданной полосе частот;
- малая нестабильность выходного напряжения (мощности) шума с течением времени, при изменении внешних условий и различных влияющих величин;
- широкие пределы регулировки выходного напряжения (мощности) шума.

Обобщенная структурная схема ИГШС (рис. 6.6) состоит из источника шума ИШ, широкополосного усилителя У и аттенюатора Атт. Измеритель выхода V позволяет контролировать уровень выходного сигнала.

Метрологические свойства ИГШС во многом определяются принципом действия и схемным построением источника шума. В качестве источника шума в ИГШС используют проволочные резисторы; болометры (вакуумный стеклянный баллон с вольфрамовой нитью); газоразрядные шумовые трубки; полупроводниковые приборы; лавинно-пролетные диоды и др.

В качестве источника шума могут использоваться также генераторы псевдослучайных последовательностей. Псевдослучайные последо-

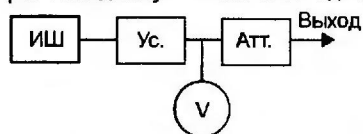


Рис. 6.6. Обобщенная схема ИГШС

вательности достаточно просто формируются с помощью цифровых логических схем и имеют характеристики, близкие к характеристикам случайных сигналов. Случайные псевдопоследовательности чисел с заданными свойствами можно реализовать также и программными средствами.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем отличие измерительных генераторов от генераторов различных радиоэлектронных изделий?
2. Назовите основные метрологические характеристики измерительных генераторов.
3. Назовите основные признаки классификации измерительных генераторов.
4. Изобразите структурную схему низкочастотного генератора и поясните принцип его работы.
5. Назовите назначение элементов структурной схемы генератора радиовещательного диапазона.
6. На каких элементах реализуют задающие генераторы в измерительных генераторах СВЧ диапазона?
7. Изобразите типовую схему генератора импульсов.

Измерение напряжений и токов

7.1. Основные значения измеряемых напряжений и токов

Измеряемые в радиоэлектронике электрические сигналы характеризуются широкой областью частот (от постоянного значения до сотен гигагерц), большим диапазоном измеряемых значений напряжений и токов (от долей микровольт и микроампер до сотен киловольт и ампер), большим многообразием форм.

Наиболее часто измеряют напряжения, несколько реже — токи. Это объясняется прежде всего тем, что для измерения тока измеряемую цепь необходимо разрывать, что не всегда возможно или желательно, и наоборот, измерение напряжения можно проводить без нарушения целостности измеряемой электрической цепи.

Измеряемые электрические сигналы (токи или напряжения) представляют собой, как правило, сложные функции времени. Поэтому для анализа и сравнения различных сигналов стремятся использовать такие их значения, которые характеризовали бы сигналы любой формы. Наиболее распространенными в электрорадиоизмерительной практике являются следующие значения (параметры) напряжений и токов: амплитудное, среднее, средневыврямленное и среднеквадратическое. Рассмотрим суть этих значений применительно к напряжению.

Амплитудное (пиковое) значение представляет собой наибольшее или наименьшее мгновенное значение переменной составляющей сигнала за время измерения

$$U_m = \max_T \{U(t)\}, \quad (7.1)$$

где $\max_T$ — операция нахождения максимального значения сигнала $U(t)$ на интервале измерения T .

В общем случае положительные и отрицательные пиковые значения переменного напряжения могут быть различными.

Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения определяется выражением

$$U_{cp} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} U(t) dt, \quad (7.2)$$

где T_1 — время наблюдения или период электрического колебания; T_2 — время действия измеряемого напряжения.

Интервалы T_1 и T_2 не всегда равны друг другу. При измерении среднего значения импульсных напряжений время действия измеряемого напряжения меньше периода электрического колебания ($T_2 < T_1$).

По физическому смыслу $U_{\text{ср}}$ — это постоянная составляющая сигнала $U(t)$ за время T_1 , а графически — это высота прямоугольника с основанием T_1 , площадь которого равна площади, определяемой функцией $U(t)$ и осью времени за один период.

Средневыпрямленное значение напряжения

$$U_{\text{св}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} |U(t)| dt. \quad (7.3)$$

Графически $U_{\text{св}}$ — это высота прямоугольника с основанием T_1 , площадь которого равна площади, определяемой функцией $U(t)$ над и под осью времени. При таком определении считается, что операция нахождения средневыпрямленного значения осуществляется с помощью двухполупериодного детектора средневыпрямленных значений. Заметим, что для однополярных сигналов $U_{\text{ср}}$ и $U_{\text{св}}$ равны между собой.

Среднеквадратическое значение напряжения — это корень квадратный из среднего значения квадрата напряжения:

$$U_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} U^2(t) dt}. \quad (7.4)$$

Среднеквадратическое значение периодического сигнала сложной формы может определяться также как сумма квадратов постоянной составляющей и среднеквадратических значений отдельных гармоник, т.е.

$$U_{\text{ск}} = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2}. \quad (7.5)$$

Постоянную составляющую U_0 и гармоники $U_1, U_2, \dots, U_n$ находят, как известно, путем разложения сложной функции времени $U(t)$ в ряд Фурье.

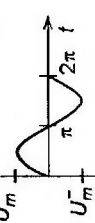
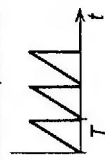
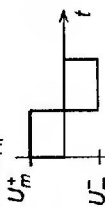
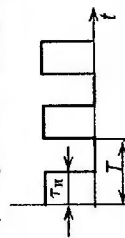
Пиковое, среднеквадратическое и средневыпрямленное значения напряжений сигналов любой формы связаны между собой коэффициентами амплитуды K_a , формы K_Φ и усреднения K_y :

$$K_a = \frac{U_m}{U_{\text{ск}}}; \quad K_\Phi = \frac{U_{\text{ск}}}{U_{\text{св}}}; \quad K_y = K_a K_\Phi. \quad (7.6)$$

Конкретные значения K_a и K_Φ зависят от формы сигналов и вычисляются с использованием формул (7.2), (7.3) и (7.4). Основные соотношения между значениями наиболее часто применяемых форм сигналов приведены в табл. 7.1 [26].

Таблица 7.1

Количественные соотношения между различными значениями коэффициентов

Вид сигнала	Значение сигнала					K_a	K_ϕ
	Мгновенное, $U(t)$	Среднее, U_{cp}	Средне- выпрямлен- ное, $U_{св}$	Средне- квадрати- ческое, $U_{ск}$	Пиковое, U_m		
Синусоидальный 	$U_m \sin \omega t$	0	$\frac{U_{ск}}{1.11}$	$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$U_m^+ = U_m^-$	1.41	1.11
Пилообразный 	$\frac{U_{max}}{T} t$	$\frac{U_{max}}{2}$	$\frac{U_{max}}{2}$	$\frac{U_{max}}{\sqrt{3}}$	U_m	1.73	1.16
Меандр 	$\begin{cases} U_m^+ & 0 < t < T/2; \\ U_m^- & T/2 < t < T \end{cases}$	0	U_{max}	U_{max}	$U_m^+ = U_m^-$	1.0	1.0
Прямоугольный импульс 	$\begin{cases} U_{max} & 0 < t < \tau_n; \\ 0 & \tau_n < t < T; \end{cases}$ $Q = \frac{T - \tau_n}{\tau_n}$	$\frac{U_{max}}{Q}$	$\frac{U_{max}}{Q}$	$\frac{U_{max}}{\sqrt{Q}}$	U_m	$\sqrt{Q}$	$\sqrt{Q}$

7.2. Вычисление различных значений переменного напряжения по показаниям вольтметров

Большинство электронных вольтметров, предназначенных для измерения переменных напряжений, градуируют в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения (за исключением импульсных вольтметров, которые градуируют обычно по амплитудному значению). Следовательно, показания таких приборов соответствуют среднеквадратическим значениям синусоидальных сигналов. А как быть, если исследователя (оператора) интересует максимальное или среднвыпрямленное значение напряжения гармонического или более сложного сигнала?

Ответы на поставленные вопросы можно найти, если знать градуировочную характеристику приборов, которая устанавливает соотношение между показанием прибора A_n и значением измеренного напряжения $A = \varphi[U(t)]$.

В общем виде для приборов с закрытым для постоянной составляющей сигнала входом градуировочную характеристику можно представить в следующем виде: [55]:

$$A_n = C\varphi[U(t) - U_{nc}], \quad (7.7)$$

где C — градуировочный коэффициент, зависящий от вида преобразователя; φ — функциональные преобразования вида (7.1)–(7.5); U_{nc} — постоянная составляющая измеряемого сигнала.

Для приборов с открытым входом

$$A_n = C\varphi[U(t)]. \quad (7.8)$$

Для уяснения сущности градуировочной характеристики рассмотрим процесс градуировки с помощью схемы на рис. 7.1, где параллельно включены три прибора, имеющие преобразователь пиковых значений ППЗ, преобразователь среднвыпрямленных значений ПСВЗ и преобразователь среднеквадратических значений ПСКЗ.

Шкалы всех вольтметров среднеквадратические и градуируют по образцовому вольтметру, имеющему также среднеквадратическую шкалу.

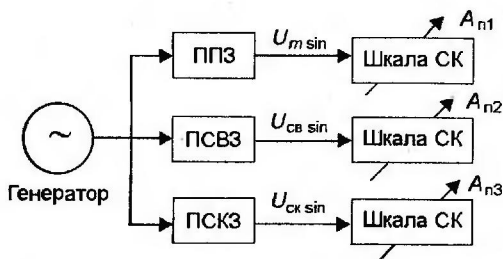


Рис. 7.1. Упрощенная схема градуировки вольтметра

При одном и том же значении входного гармонического сигнала показания вольтметров будут отсчитаны в среднеквадратических значениях, в соответствии с (7.8), т.е. можно записать

$$\begin{aligned} A_{п1} &= U_{с\kappa \sin} = C_1 U_{m \sin}; \\ A_{п2} &= U_{с\kappa \sin} = C_2 U_{св \sin}; \\ A_{п3} &= U_{с\kappa \sin} = C_3 U_{с\kappa \sin}. \end{aligned} \quad (7.9)$$

С учетом (7.6) градуировочные характеристики запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} A_{п1} &= \frac{1}{K_{a \sin}} U_{m \sin}; \\ A_{п2} &= K_{\phi \sin} U_{св \sin}; \\ A_{п3} &= U_{с\kappa \sin}. \end{aligned} \quad (7.10)$$

Таким образом, при проведенной градуировке, когда шкалы всех приборов градуированы с СКЗ синусоидального напряжения, по показаниям приборов могут быть определены все остальные параметры синусоидального сигнала через коэффициенты амплитуды и формы, независимо от типа преобразователя, используемого в данном вольтметре:

$$\begin{aligned} U_{m \sin} &= A_{п} K_{a \sin} = 1,41 A_{п}; \\ U_{св \sin} &= A_{п} / K_{\phi \sin} = 0,9 A_{п}. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Поставим вопрос, можно ли отградуированными вольтметрами измерять напряжение сигнала сложной формы U_x (отличного от синусоидального)?

Представим, что на три вольтметра схемы на рис. 7.1 вместо гармонического сигнала подается сигнал $U_x(t)$, значения которого нужно определить. В этом случае по аналогии с (7.10) показания приборов запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} A_{п1} &= \frac{1}{K_{a x}} U_{m x}; \\ A_{п2} &= K_{\phi x} U_{св x}; \\ A_{п3} &= U_{с\kappa x}. \end{aligned}$$

Очевидно, что $K_{a x} \neq K_{a \sin}$ и $K_{\phi x} \neq K_{\phi \sin}$, поэтому показания $A_{п1}$ и $A_{п2}$ приборов, проградуированных синусоидальным сигналом, не будут соответствовать параметрам измеряемого сложного сигнала. Показание третьего прибора $A_{п3}$, проградуированного в значениях параметра, на который реагирует его преобразователь ($C = 1$), будет соответствовать значению измеряемого сигнала, т.е. показания этого вольтметра не зависят от формы измеряемого напряжения.

Таким образом, при измерении сложного сигнала вольтметрами,

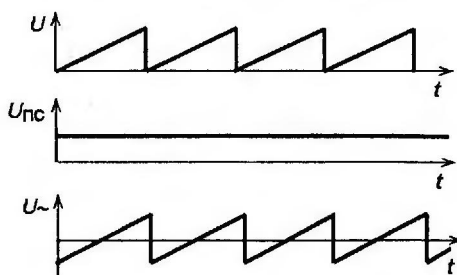


Рис. 7.2. Представление пилообразного напряжения в виде двух составляющих

проградуированными гармоническим сигналом в значениях, отличных от значений, на которые реагирует преобразователь, имеет место систематическая погрешность, величина которой будет тем больше, чем больше K_{ax} и $K_{\phi x}$ будут отличаться от $K_{a \sin}$ и $K_{\phi \sin}$.

Следовательно, в этом случае при измерении несинусоидального напряжения показания приборов должны быть переоценены, т.е. внесены поправки в соответствии со значениями K_{ax} и $K_{\phi x}$ измеряемого сигнала. При внесении поправок в первую очередь следует, используя $K_{a \sin}$ или $K_{\phi \sin}$, определить значение напряжения, на которое реагирует преобразователь, а затем другие значения напряжений. Например, при использовании вольтметра с пиковым преобразователем и среднеквадратической шкалой непосредственно по показанию прибора первоначально находится

$$U_{mx} = A_n K_{a \sin},$$

а затем

$$U_{cx} = A_n K_{a \sin} / K_{ax}; \quad U_{cp.в} = A_n K_{a \sin} / K_{ax} K_{\phi x}.$$

Если вольтметр имеет закрытый вход, то измеряемое напряжение сложной формы следует представить как сумму двух напряжений: постоянного ($U_{пс}$), равного среднему значению, и переменного ($U_{\sim}$) с нулевым средним значением (рис. 7.2) и при определении значений различных параметров напряжений следует воспользоваться градуировочной характеристикой (7.7).

Пример. С помощью милливольтметра с закрытым входом измеряется цифровой сигнал (импульсная последовательность амплитудой U_m , длительность импульсов τ , период следования T). Прибор имеет преобразователь пиковых значений и среднеквадратическую шкалу. Показание прибора $A_n = 50$ мВ. Определить амплитудное (U_m), среднеквадратическое (U_{cx}) и средневыпрямленное ($U_{св}$) значения измеряемого напряжения.

Учитывая (7.7) и (7.6), запишем

$$A_n = \frac{1}{K_{a \sin}} (U_m - U_0).$$

Для последовательности прямоугольных импульсов (см. табл. 7.1)

$$U_0 = \frac{U_m}{Q}, \quad A_n = \frac{1}{K_a \sin} U_m \left(1 - \frac{1}{Q}\right).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} U_m &= A_n K_a \sin \frac{Q}{Q-1}; \\ U_{с\kappa} &= \frac{U_m}{K_{а\kappa}} = A_n K_a \sin \frac{\sqrt{Q}}{Q-1}; \\ U_{св} &= \frac{U_{с\kappa}}{K_{\phi\kappa}} = A_n K_a \sin \frac{1}{Q-1}. \end{aligned}$$

При $Q = 2$ имеем $U_m = 141$ мВ; $U_{с\kappa} = 99,4$ мВ; $U_{св} = 70,5$ мВ.

7.3. Методы измерения напряжения и тока

Для измерения напряжения и тока в настоящее время используют метод непосредственной оценки, при котором числовое значение измеряемой величины определяется по отсчетному устройству, отградуированному в единицах этой величины, и метод сравнения, при котором значение измеряемой величины определяется на основе сравнения воздействия измеряемой величины на какую-либо систему с воздействием на эту же систему образцовой меры.

7.3.1. Метод непосредственной оценки

Этот метод реализуется с помощью прямопоказывающих приборов. Вольтметр подключается параллельно тому участку цепи, на котором необходимо измерить напряжение.

Измерение напряжений всегда сопровождается погрешностью, величина которой зависит от внутреннего сопротивления вольтметра R_V . Включение вольтметра в исследуемую цепь искажает режим работы этой цепи.

Например, напряжение на резисторе R_2 до включения вольтметра (рис. 7.3)

$$U_{R_2} = \frac{U R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7.14)$$

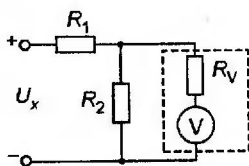


Рис. 7.3. Схема измерения напряжения методом непосредственной оценки

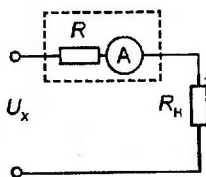


Рис. 7.4. Схема измерения тока методом непосредственной оценки

Напряжение на этом же резисторе после включения вольтметра

$$U'_{R_2} = \frac{U R_2 R_V / (R_2 + R_V)}{R_1 + R_2 R_V / (R_2 + R_V)}. \quad (7.15)$$

Погрешность измерения в данном случае тем больше, чем меньше сопротивление вольтметра:

$$\Delta = U'_{R_2} - U_{R_2}; \quad \delta = \frac{U'_{R_2} - U_{R_2}}{U_{R_2}} = -\frac{R_2 / R_V}{1 + R_2 / R_V + R_2 / R_1}. \quad (7.16)$$

Относительную погрешность измерения напряжения можно выразить также через мощность P_V , потребляемую вольтметром, и мощность цепи P :

$$\delta = -\frac{P_V / P}{1 + P_V / P + P_2 / R_1}. \quad (7.17)$$

Следовательно, погрешность от искажения режима работы цепи при измерении напряжений тем меньше, чем меньше мощность, потребляемая из цепи, и сопротивление R_1 .

При непосредственной оценке тока результат измерения (как и при измерении напряжения) сопровождается погрешностью, величина которой зависит от внутреннего сопротивления амперметра R_A .

Так, например, включение амперметра в цепь, изображенную на рис. 7.4, приведет к тому, что вместо тока $I = U/R$, который протекал в цепи до включения амперметра, будет протекать ток $I' = U/(R + R_A)$.

Погрешность $\Delta = I' - I$ тем больше, чем больше сопротивление амперметра. Относительная погрешность измерения тока в этом случае

$$\delta = \frac{I' - I}{I} = \frac{U/(R + R_A) - U/R}{U/R} = -\frac{R_A / R}{1 + R_A / R}. \quad (7.18)$$

Отношение сопротивлений можно заменить отношением мощности P_A , потребляемой амперметром, к мощности в самой цепи P :

$$\delta = -\frac{P_A / P}{1 + P_A / P}.$$

Таким образом, погрешность измерения тем меньше, чем меньше R_A , т.е. чем меньше мощность, потребляемая амперметром P_A , по сравнению с мощностью потребления цепи, в которой осуществляется измерение.

7.3.2. Метод сравнения с мерой

Метод сравнения основан на сравнении измеряемого напряжения с известным напряжением, установленным с высокой точностью. Из общеизвестных методов сравнения наибольшее применение при измерении напряжения получил нулевой (компенсационный) метод.

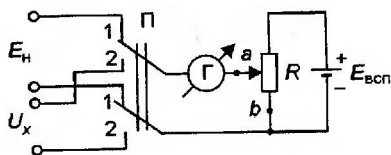


Рис. 7.5. Упрощенная схема компенсатора постоянного тока

Суть нулевого метода измерения постоянного напряжения состоит в уравнивании (компенсации) неизвестного напряжения на образцовом сопротивлении R . Момент компенсации определяется по нулевому показанию гальванометра. Принцип действия компенсатора поясняется схемой, приведенной на рис. 7.5, где используется нормальный элемент E_n , вспомогательный источник напряжения $E_{всп}$, потенциометр R , переключатель Π и гальванометр Γ .

Измерение напряжения происходит в два этапа.

Переключатель устанавливают в 1-е (верхнее) положение, с помощью потенциометра R достигается нулевое показание гальванометра. В этом случае падение напряжения за счет тока I от $E_{всп}$ на участке ab (R_{ab}) резистора R компенсируется источником E_n :

$$IR_{ab} = E_n. \quad (7.19)$$

Переключатель устанавливают во 2-е (нижнее) положение, и с помощью потенциометра R вновь уравнивается схема. При этом движок потенциометра займет новое положение, сопротивление участка ab будет равно R'_{ab} , и будет справедливо равенство

$$IR'_{ab} = U_x. \quad (7.20)$$

Из равенства токов (7.19) и (7.20) следует, что

$$U_x = E_n R'_{ab} / R_{ab}. \quad (7.21)$$

Условие равновесия (7.21) показывает, что точность измерения в данном методе зависит от точности, с которой известны ЭДС нормального элемента E_n и отношение установившихся значений сопротивлений потенциометра, а также чувствительности гальванометра.

Нормальный элемент E_n в рассматриваемой схеме — это электрохимическое устройство, воспроизводящее единицу измерения напряжения. Наибольшее распространение получили нормальные элементы с насыщенным электролитом ($E_n = 1,01865$ В при температуре 20°C , внутреннее сопротивление $500 \dots 1000$ Ом, ток 1 мкА). ЭДС нормального элемента E_n хотя и слабо, но зависит от температуры, поэтому в практические схемы компенсаторов обычно включают небольшие переменные резисторы, компенсирующие уход E_n за счет температурных изменений.

Точность отсчета с потенциометра достигается обычно за счет использования специальных схем многоразрядных дискретных делителей напряжения.

К достоинствам метода можно отнести следующее:

- в момент компенсации ток от измеряемого источника напряжения в цепи компенсации отсутствует, т.е. практически измеряется значение ЭДС на зажимах источника напряжения;
- отсутствие тока в цепи гальванометра позволяет исключить влияние сопротивления соединительных проводов на результат измерения;
- при полной компенсации мощность от объекта измерения не потребляется (тока нет).

Метод сравнения применяется также для измерения переменных напряжений. Принцип действия схем сравнения на переменном токе, как и аналогичных схем компенсаторов на постоянном токе, состоит в уравнивании измеряемого напряжения известным напряжением, создаваемым переменным (обычно синусоидальным) током на активных сопротивлениях вспомогательной цепи. Для уравнивания схемы здесь необходимо добиться равенства модулей измеряемого и сравниваемого напряжений, их частот, а также противоположность фаз. Полного уравнивания в таких схемах добиться сложно, поэтому компенсаторы переменного тока имеют меньшую точность измерения по сравнению с компенсаторами постоянного тока.

В зависимости от способа уравнивания по величине и фазе измеряемого известного напряжения различают полярно-координатные и прямоугольно-координатные схемы.

7.4. Приборы для измерения напряжения и тока

Приборы для измерения напряжения и тока можно классифицировать по различным признакам:

- по типу отсчетного устройства (аналоговые и цифровые);
- по методу измерения (непосредственной оценки (прямого действия) и сравнения с мерой);
- по значению измеряемого напряжения (пиковых значений, средневыпрямленных значений, среднеквадратических значений);
- по виду входа (с открытым или закрытым).

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество электромеханических и электронных приборов для измерения напряжений и токов. Рассмотрим принципы их построения.

7.4.1. Электромеханические вольтметры и амперметры

Электромеханические вольтметры и амперметры относятся к аналоговым приборам прямого действия, в которых электрическая измеряемая величина непосредственно преобразуется в показание отсчетного устройства.

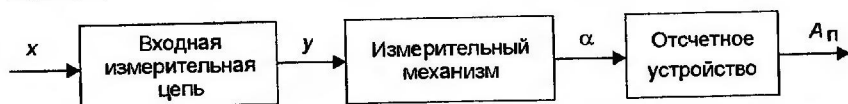


Рис. 7.6. Обобщенная структурная схема электромеханического измерительного прибора

В простейшем случае электромеханические вольтметры и амперметры представляют собой измерительный механизм с отсчетным устройством (см. гл. 5), снабженный входными зажимами для подключения к объекту измерения.

Обобщенную структурную схему электромеханического вольтметра (амперметра) можно представить в виде последовательно соединенных входной измерительной цепи и измерительного механизма с отсчетным устройством (рис. 7.6). (Заметим, что сочетание измерительного механизма и отсчетного устройства принято называть измерителем.)

Входная измерительная цепь (входное устройство) содержит, как правило, один или несколько измерительных преобразователей, с помощью которых измеряемая величина x преобразуется в величину y , удобную для воздействия на измерительный механизм.

Наиболее часто в электромеханических приборах используют масштабные и нормирующие измерительные преобразователи, а также преобразователи значений величин.

Приведенная на рис. 7.6 обобщенная схема электромеханического прибора допускает различное сочетание рассмотренных ранее преобразователей и измерительных механизмов (см. гл. 5).

Для измерения напряжений и токов практически могут применяться большинство известных типов ИМ.

Для измерения постоянных напряжений в широком диапазоне значений (от долей милливольт до сотен вольт) используют электромеханические вольтметры с магнитоэлектрическим измерительным механизмом (МЭИМ). Эти приборы имеют сравнительно высокий класс точности (до 0,05), однако их входное сопротивление не превышает десятков тысяч Ом, что может приводить к значительным систематическим погрешностям. Систематические погрешности вольтметров с МЭИМ имеют также и температурный характер из-за зависимости сопротивления рамки прибора от температуры окружающей среды.

Реже для измерения постоянных напряжений используют электромеханические вольтметры с электростатическим измерительным механизмом (ЭСИМ), электромагнитным ИМ (ЭМИМ) и электродинамическим ИМ (ЭДИМ).

Вольтметры с ЭСИМ обычно используют для измерения больших напряжений (киловольтметры), а вольтметры с ЭДИМ применяют в качестве образцовых приборов при проверке измерительных приборов более низкого класса точности. Термоэлектрические приборы для измерения постоянных напряжений практически не применяют из-за относительно большой мощности, потребляемой от измеряемого источника.

Для измерения постоянных токов в широком диапазоне значений (от 10^{-7} до 50 А) наиболее широко, так же как при измерении постоянных напряжений, используют электромеханические приборы (амперметры) с МЭИМ. Для этих приборов также характерна температурная систематическая погрешность и особенно при использовании шунтов, так как в этом случае из-за различных значений температурных коэффициентов материала рамки и шунта происходит перераспределение протекающих через них токов. Для измерения постоянных токов используют также амперметры с ЭИМ и с ЭДИМ.

Измерение переменных напряжений проводят вольтметрами с ЭИМ, ЭДИМ, ФДИМ, ЭСИМ, термоэлектрическими приборами, а также выпрямительными вольтметрами, т.е. вольтметрами, имеющими измерительный механизм магнитоэлектрической системы и выпрямитель (преобразователь), включенный на входе измерительного механизма.

Вольтметры с ЭДИМ и ЭСИМ обычно предназначаются для работы в лабораторных условиях. Наиболее широкий частотный рабочий диапазон имеют вольтметры с ЭСИМ и термоэлектрические, однако последние применяют редко из-за большой мощности, потребляемой от источника сигнала.

Переменные токи измеряют термоэлектрическими и выпрямительными амперметрами, а также амперметрами, имеющими электромагнитные и электродинамические измерительные механизмы. Малые переменные токи измеряют обычно выпрямительными амперметрами. Наиболее широкий диапазон измеряемых переменных токов обеспечивают выпрямительные амперметры, они чаще используются для измерения малых токов. Наиболее широкий частотный диапазон измеряемых токов обеспечивают амперметры термоэлектрической системы.

У большинства электромеханических приборов входное сопротивление невелико (килоомы), поэтому они пригодны для измерения напряжения только в низкоомных цепях. В цепях с высокоомными нагрузками (мегаомы) эти приборы (за исключением электростатических) использовать нельзя, так как при их включении шунтируется нагрузка и тем самым изменяется электрический режим цепи. Кроме того, типовыми недостатками для аналоговых электромеханических приборов являются малый диапазон частот, в котором они дают достоверные показания, большие входные емкости и индуктивности, зависимость входного сопротивления от частоты.

На практике широкое распространение получили универсальные электромеханические приборы для измерения постоянных и переменных напряжений и токов, а также сопротивлений постоянному току — авометры (мультимеры). Они представляют собой сочетание добавочных резисторов или шунтов, преобразователей значений измеряемых переменных токов и напряжений (полупроводниковых выпрямителей) и измерительного механизма магнитоэлектрической системы с отсчетным устройством.

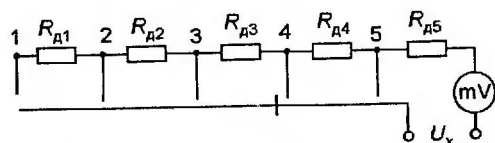


Рис. 7.7. Упрощенная схема авометра в режиме измерения постоянного напряжения

Вариант схемы авометра при измерении напряжения постоянного тока показан на рис. 7.7.

Переключателем осуществляется изменение диапазона измерений, однако входное сопротивление вольтметра, отсчитанное в Ом/В, при изменении диапазона обычно делается постоянным за счет подбора резисторов. Например, если $R_1 = 15 \text{ МОм}$, $R_2 = 4 \text{ МОм}$, $R_3 = 800 \text{ кОм}$, $R_4 = 150 \text{ кОм}$, $R_5 = 48 \text{ кОм}$, а диапазоны соответственно 1000, 250, 50, 10, 2,5 В, то при сопротивлении обмотки прибора 2 кОм входное сопротивление прибора в любом положении переключателя диапазонов будет равно 20 кОм/В.

7.4.2. Аналоговые электронные вольтметры и амперметры

Электронным вольтметром называется измерительный прибор, показания которого вызываются током от источника питания, а измеряемое напряжение управляет величиной этого тока. Электронные вольтметры имеют в своем составе усилители.

Номенклатура выпускаемых промышленностью электронных вольтметров достаточно широкая. В качестве основного признака, по которому принято классифицировать электронные вольтметры, — это их назначение. Различают следующие виды вольтметров:

- В1 — установки или приборы для проверки вольтметров;
- В2 — вольтметры постоянного тока;
- В3 — вольтметры переменного тока;
- В4 — вольтметры импульсного тока;
- В5 — вольтметры фазочувствительные;
- В6 — вольтметры селективные;
- В7 — вольтметры универсальные;
- В8 — измерители отношения напряжений и разности напряжений;
- В9 — преобразователи напряжений.

Электронные вольтметры в отличие от электромеханических имеют большое входное сопротивление. Они обеспечивают измерение напряжений в высокоомных цепях без нарушения их электрических режимов. Измерения могут проводиться в широком диапазоне частот от постоянного тока до единиц гигагерц.

Аналоговые электронные вольтметры исполняются в основном по схемам, показанным на рис. 7.8.

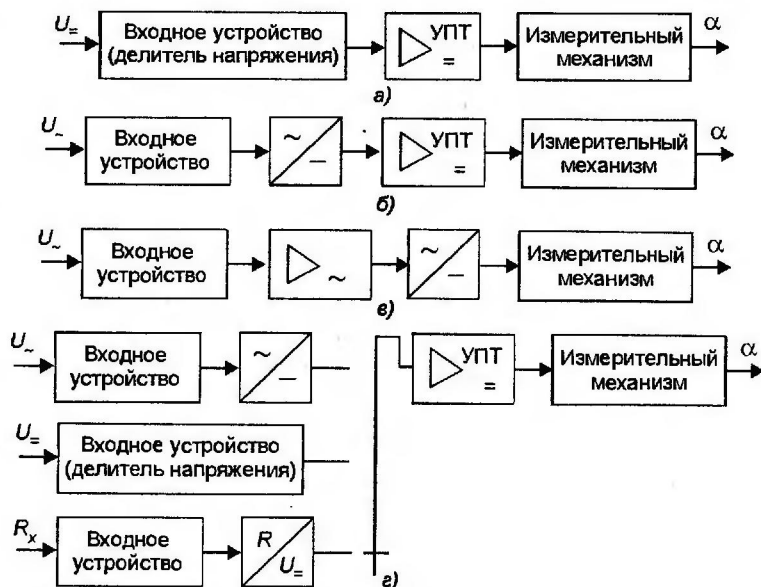


Рис. 7.8. Обобщенная схема аналогового электронного измерительного прибора

Электронный вольтметр постоянного напряжения состоит из входного устройства, усилителя постоянного тока (УПТ), измерительного механизма и отсчетного устройства (рис. 7.8, а).

Входное устройство представляет собой обычно многопредельный высокоомный делитель на резисторах. Важным элементом такой схемы вольтметра является УПТ.

Делитель и усилитель постоянного тока обеспечивают ослабление или усиление входного напряжения до значений, необходимых для нормальной работы измерительного механизма. Измерительный механизм обычно магнитоэлектрический.

Аналоговые электронные вольтметры постоянного тока имеют основную погрешность 0,5...5 % [26]. Основными источниками погрешности являются нестабильность элементов схем, собственные шумы электронных цепей, измерительные механизмы, градуировка шкалы.

Аналоговые электронные вольтметры переменного тока в большинстве случаев реализуют по схеме, представленной на рис. 7.8, б.

Обязательным элементом измерительной цепи здесь является преобразователь переменного напряжения в постоянное. Постоянное напряжение на выходе этих преобразователей пропорционально одному из значений измеряемого переменного напряжения: амплитудному, средневывпрямленному, среднеквадратическому. В связи с этим вольтметры называют вольтметрами амплитудного, средневывпрямленного и среднеквадратического значений. Однако независимо от вида преобразователя шкалу вольтметров переменного тока, как правило, градуируют в

среднеквадратических значениях напряжения синусоидальной формы, что следует учитывать при определении значения измеряемой величины (см. разд. 7.2).

Преобразователи амплитудных (пиковых) значений (ППЗ) часто выполняют в виде выносного пробника, позволяющего подключить его непосредственно к источнику измеряемого напряжения, что дает возможность уменьшить негативное влияние входной цепи и, как следствие, расширить диапазон частот измеряемого напряжения (до 1000 МГц).

Рассматриваемые вольтметры имеют обычно широкий частотный диапазон измерений (10 Гц...1000 МГц), но не обладают высокой чувствительностью, т.е. с их помощью нельзя измерять малые напряжения (меньше нескольких долей вольт), так как преобразователь не обеспечивает выпрямление малых сигналов.

Более чувствительными являются вольтметры, выполненные по схеме, представленной на рис. 7.8, в. Вольтметры этого типа используют для измерения малых напряжений переменного тока от единиц микровольт до единиц вольт. Это возможно благодаря предварительному усилению переменного тока. Однако создание усилителей, работающих в широком диапазоне частот и имеющих большой коэффициент усиления, — трудная техническая задача, поэтому такие вольтметры имеют относительно низкий частотный диапазон (1...10 МГц).

На рис. 7.8, г показана схема универсального вольтметра. В зависимости от положения переключателя прибор работает по схеме вольтметра переменного тока, вольтметра постоянного тока и измерителя сопротивления. В режиме измерения сопротивления в схему включается преобразователь, выходное напряжение которого зависит от величины измеряемого сопротивления R_x , подключаемого к входу преобразователя, а шкала прибора при этом измерении отградуирована в единицах сопротивления.

7.4.3. Цифровые электронные вольтметры

В цифровых электронных вольтметрах (ЦЭВ) в отличие от аналоговых обязательными элементами схемы являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и цифровые отсчетные устройства (ЦОУ) (рис. 7.9). Измеряемое напряжение в таких приборах вначале преобразуется входным аналоговым преобразователем ВАП к виду, удобному для последующего преобразования, с помощью АЦП происходит его дискретизация и кодирование, а затем в ЦОУ осуществляется цифровой отсчет значения измеряемой величины.

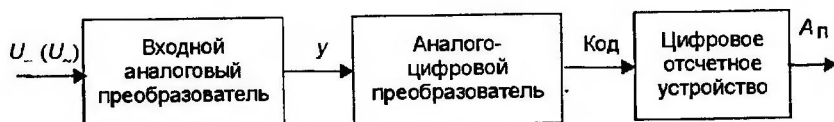


Рис. 7.9. Структурная схема цифрового электронного вольтметра

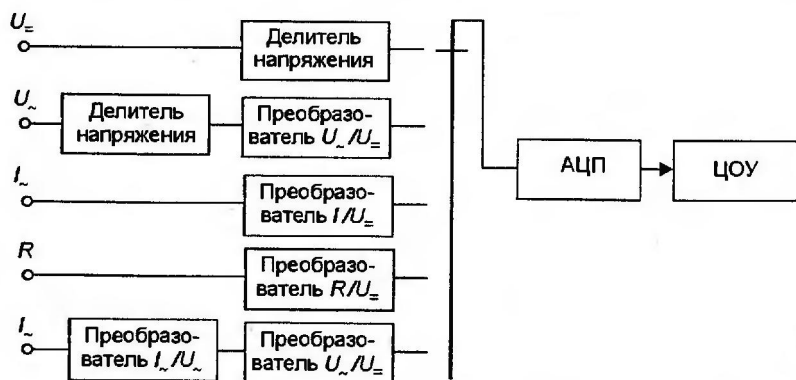


Рис. 7.10. Обобщенная схема универсального цифрового электронного измерительного прибора

Схемное решение цифровых электронных вольтметров определяется видом аналого-цифрового преобразователя.

Принцип действия и метрологические свойства некоторых преобразователей рассмотрены в гл. 5.

В настоящее время широко распространены универсальные цифровые электронные вольтметры (мультимеры), измеряющие постоянное напряжение, среднеквадратическое значение переменного напряжения, силу тока и сопротивление. Обобщенная схема такого прибора приведена на рис. 7.10.

В качестве преобразователя переменного напряжения в постоянное чаще используется преобразователь средневпрямленного значения.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте математическое определение среднему, средневпрямленному, среднеквадратическому значениям переменного напряжения.
2. Чем определяется взаимосвязь между пиковым, средневпрямленным и среднеквадратическим значениями переменного напряжения?
3. Запишите градуировочную характеристику для измерительных приборов с закрытым входом.
4. Поясните порядок определения различных значений измеряемых величин прибором с открытым входом при измерении переменного напряжения сложной формы.
5. Назовите основные методы измерения напряжения и тока.
6. Чем определяется погрешность измерения напряжения и тока при использовании метода непосредственной оценки?
7. Каковы достоинства метода сравнения с мерой?
8. Нарисуйте обобщенную структурную схему электромеханического измерительного прибора.
9. Почему для авометров входное сопротивление нормируется в Ом/В?
10. Нарисуйте обобщенную схему аналогового электронного вольтметра.
11. Поясните принцип действия и работу схемы цифрового электронного вольтметра.

Исследование формы электрических сигналов

8.1. Классификация и характеристики электронно-лучевых осциллографов

Приборы, предназначенные для визуального наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов, называют осциллографами.

Осциллографы находят широкое применение в различных областях человеческой деятельности. При эксплуатации радиоэлектронных средств распространение получили электронно-лучевые осциллографы.

Электронно-лучевые осциллографы относят в соответствии с ГОСТ 15094-86 к подгруппе С и по функциональному назначению делят на следующие виды: С1 — универсальные; С7 — скоростные и стробоскопические; С8 — запоминающие; С9 — специальные. Кроме того, выделяют осциллографы многолучевые, многоканальные (двухканальные) и цифровые.

В электронно-лучевых (электронных) осциллографах для наблюдения и измерения параметров сигнала используют экран электронно-лучевой трубки. В основу работы такого осциллографа положен принцип управления электронным лучом трубки самим исследуемым сигналом.

Универсальные электронные осциллографы обладают большими возможностями. Они позволяют наблюдать параметры различных сигналов в широком диапазоне уровней (от долей милливольт до сотен вольт) и частот (до десятков мегагерц). В универсальных осциллографах исследуемый сигнал обычно подается через канал вертикального отклонения на вертикально отклоняющие пластины, а развертка изображения осуществляется через пластины горизонтального отклонения за счет использования сигнала развертки.

Скоростные осциллографы отличаются от универсальных наличием узлов, обеспечивающих наблюдение импульсных сигналов наносекундной длительности. Такими узлами являются специальный генератор развертки, электронная трубка с вертикально отклоняющей системой типа «бегущая волна». Полоса пропускания таких осциллографов составляет несколько сотен мегагерц.

Стробоскопические осциллографы, как и скоростные, обеспечивают наблюдение коротких импульсов (от долей наносекунд до единиц микросекунд), однако в данном случае не требуется применение специальных электронно-лучевых трубок. Эффект достигается за счет получения широкой эквивалентной полосы пропускания (тысячи мегагерц). Изображение исследуемого импульса на экране электронной трубки стробоскопического осциллографа получается путем дискретизации сигнала. Производится считывание отдельных дискретных значений исследуемого повторяющегося сигнала, и он воспроизводится на экране в виде совокупности светящихся точек, образующих осциллограмму.

Запоминающие осциллографы обладают способностью сохранять изображение сигналов в течение длительного времени и поэтому удобны для исследования однократных и редко повторяющихся сигналов. Такой эффект достигается благодаря применению специальных электронно-лучевых трубок с накоплением заряда.

Специальные осциллографы предназначены для наблюдения сложных по составу сигналов, например телевизионных.

Многолучевые осциллографы в отличие от однолучевых обеспечивают наблюдение одновременно нескольких процессов. Электронно-лучевая трубка в таких осциллографах имеет особую конструкцию, состоящую из нескольких электронно-оптических систем и нескольких систем отклоняющих пластин.

Для одновременного исследования двух и более сигналов используют также многоканальные осциллографы. В таких осциллографах в тракт вертикального отклонения встраивают многоканальный электронный коммутатор, который обеспечивает получение изображения нескольких сигналов на однолучевой трубке при последовательном подключении этих сигналов к тракту вертикального отклонения.

Отдельные типы и виды осциллографов обладают своими специфическими характеристиками. Вместе с тем большинство осциллографов имеют общие характеристики, которые позволяют сопоставлять осциллографы между собой и выбирать нужные для проведения исследований. Рассмотрим основные характеристики осциллографов.

Коэффициент отклонения $K_{\text{отк}}$ — параметр, характеризующий усилительные свойства канала вертикального отклонения осциллографа. $K_{\text{отк}}$ определяется отношением напряжения входного сигнала U к отклонению луча L , вызванному этим напряжением:

$$K_{\text{отк}} = U/L. \quad (8.1)$$

Отклонение луча оценивается в единицах длины или в делениях сетки экрана осциллографа. Универсальные осциллографы имеют $K_{\text{отк}}$ от десятков микровольт до десятков вольт на деление (10 мкВ/дел... 10 В/дел). Величину, обратную $K_{\text{отк}}$, называют чувствительностью

$$S = 1/K_{\text{отк}} = L/U.$$

Таким образом, если $K_{\text{отк}}$ определяет количество вольт, необходимых для отклонения луча на один сантиметр или на одно деление, то S определяет величину отклонения светящегося пятна в сантиметрах при подаче на вход напряжения величиной 1 В.

Коэффициент развертки K_p — отношение интервала времени Δt к отклонению луча L , вызванному напряжением развертки за это время:

$$K_p = \Delta t / L. \quad (8.2)$$

Иначе говоря, коэффициентом развертки определяется время, необходимое для пробега лучом пути в одно деление (1 см) вдоль оси X . K_p оценивается отношением единицы времени к единице длины или к делению сетки экрана осциллографа [с/см], [с/дел].

Обычно осциллографы имеют широкий диапазон изменения коэффициента развертки. Универсальные осциллографы характеризуются коэффициентом развертки от 10 с/см до 10 нс/см.

Вместо коэффициента развертки часто используют понятие «скорость развертки»

$$V_p = 1/K_p = L/\Delta t.$$

В универсальных осциллографах скорость развертки изменяется от единиц сантиметров до десятков километров в секунду.

Входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ осциллографа вносит дополнительную погрешность измерения. Чтобы погрешность была пренебрежимо мала, необходимо обеспечить, чтобы $R_{\text{вх}}$ было значительно больше выходного сопротивления источника сигнала $R_{\text{вых}}$ ($R_{\text{вх}} \geq 100 R_{\text{вых}}$). Обычно $R_{\text{вх}} \geq 1 \text{ МОм}$.

Входная емкость осциллографа $C_{\text{вх}}$. Как и $R_{\text{вх}}$, входная емкость вносит дополнительную погрешность. $C_{\text{вх}}$ и выходное сопротивление источника сигнала $R_{\text{вых}}$ образуют цепь с постоянной времени $\tau_{\text{вх}} = R_{\text{вых}} C_{\text{вх}}$, которая удлиняет фронт сигнала $\tau_{\text{ф.с}}$ до $\tau'_{\text{ф.с}}$:

$$\tau'_{\text{ф.с}} = \sqrt{\tau_{\text{ф.с}}^2 + (2,2\tau_{\text{вх}})^2}. \quad (8.3)$$

Входная емкость осциллографа достигает 40...50 пФ, а с соединительным кабелем превышает 100 пФ.

Полоса пропускания — диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения $K_{\text{отк}}$ изменяется не более чем на 3 дБ (3 дБ = $20 \lg U_{0,707}/U_{\text{max}}$) относительно его значения на некоторой средней частоте. Для универсальных осциллографов верхняя частота достигает десятков мегагерц, а для скоростных — сотен мегагерц.

Следует иметь в виду, что при малом коэффициенте отклонения ($\approx 200 \text{ мкВ/см}$ и ниже) и широкой полосе пропускания растет уровень шумов, что затрудняет изучение слабых сигналов.

Переходная характеристика (ПХ) — это изменение мгновенных значений напряжений во времени при подаче на вход скачка напряжения.

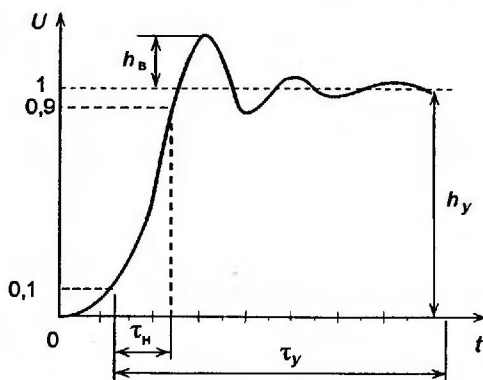


Рис. 8.1. Переходная характеристика

Основные параметры переходной характеристики показаны на рис. 8.1. На рисунке τ_H — время нарастания ПХ — это промежуток времени, при котором сигнал нарастает от 0,1 до 0,9 установившегося значения; τ_y — время установления ПХ — это промежуток времени, при котором сигнал нарастает от 0,1 до установившегося значения; h_B — высота (амплитуда) выброса ПХ.

Параметры ПХ взаимно связаны с полосой пропускания КВО, в частности, считается, что

$$\tau_H = 0,35/f_B,$$

где f_B — верхняя частота полосы пропускания, МГц; τ_H — время нарастания ПХ, нс.

При исследовании импульсных сигналов рекомендуется соблюдать конкретные соотношения между длительностью фронта импульса τ_{Φ} и временем нарастания ПХ τ_H : для треугольного импульса $\tau_{\Phi}/\tau_H \geq 10$; для колоколообразного не менее 5; для трапецеидального, синусоидального и синусквадратичного не менее 3 [55]. Погрешность измерения амплитуды и длительности при этом не превышает 2 %.

При исследовании прямоугольных или трапецеидальных импульсов длительность их фронта может быть соизмерима со временем нарастания ПХ, тогда измеренная длительность фронта $\tau_{\Phi и}$ включает в себя и время нарастания τ_H , которое следует исключить:

$$\tau_{\Phi} = \sqrt{\tau_{\Phi и}^2 - \tau_H^2}. \quad (8.4)$$

Кроме рассмотренных характеристик, осциллографы могут характеризоваться некоторыми дополнительными: погрешностью измерения напряжения, погрешностью измерения временных интервалов, погрешностью коэффициентов отклонения, погрешностью коэффициентов развертки, пределами перемещения луча по горизонтали, пределами перемещения луча по вертикали, шириной линии луча, допустимой сум-

марной величиной постоянного и переменного напряжений на закрытых входах, погрешностью калибраторов временных интервалов и калибраторов амплитуды и др.

В зависимости от количественных значений отдельных характеристик осциллографы делят на четыре класса. Основными характеристиками, определяющими класс осциллографа, являются основная погрешность измерения напряжения, основная погрешность коэффициента отклонения, основная погрешность измерения временных интервалов, основная погрешность коэффициента развертки. Так, основная погрешность измерения напряжения и основная погрешность измерения временных интервалов для осциллографов класса точности 1, 2, 3, 4 составляют 3, 5, 10 и 12 % соответственно. Основные погрешности коэффициентов развертки и отклонения для указанных классов точности осциллографов являются также одинаковыми и равны 2,5; 4; 8; 10 % соответственно.

8.2. Электронно-лучевая трубка и принцип действия электронного осциллографа

В универсальных осциллографах применяют электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим формированием и управлением луча (рис. 8.2).

Типовая однолучевая трубка (ЭЛТ) представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух и в котором расположены подогреваемый катод К, модулятор М, фокусирующий анод A_1 , ускоряющий анод A_2 , горизонтально отклоняющие пластины $ОП_x$, вертикально отклоняющие пластины $ОП_y$, третий анод A_3 . Возможны и другие дополнительные электроды. Внутренняя поверхность дна баллона (экран Э) покрыта люминофором, способным светиться под действием бомбардировки электронов. Совокупность электродов К, М, A_1 , A_2 называется прожектором. Электронный прожектор излучает узкий пучок электронов — электронный луч, для этого на электроды прожектора подают соответствующие напряжения.

Изменением отрицательного относительно катода напряжения на модуляторе можно изменять интенсивность электронного луча, т.е. регулировать яркость свечения люминофора. Напряжение на первом аноде фокусирует поток электронов в узкий луч, позволяющий получить на экране трубки светящееся пятно малого размера. Если фокусировка по осям трубки не одинакова, то возможно искажение осциллограммы. Указанное явление называют астигматизмом. В некоторые ЭЛТ для устранения астигматизма вводят специальные электроды. Высокое положительное напряжение, приложенное ко второму аноду, обеспечивает увеличение скорости пролета электронов до скорости, необходимой для нормального свечения люминофора. Сформированный электронный луч проходит между парами отклоняющих пластин $ОП_x$

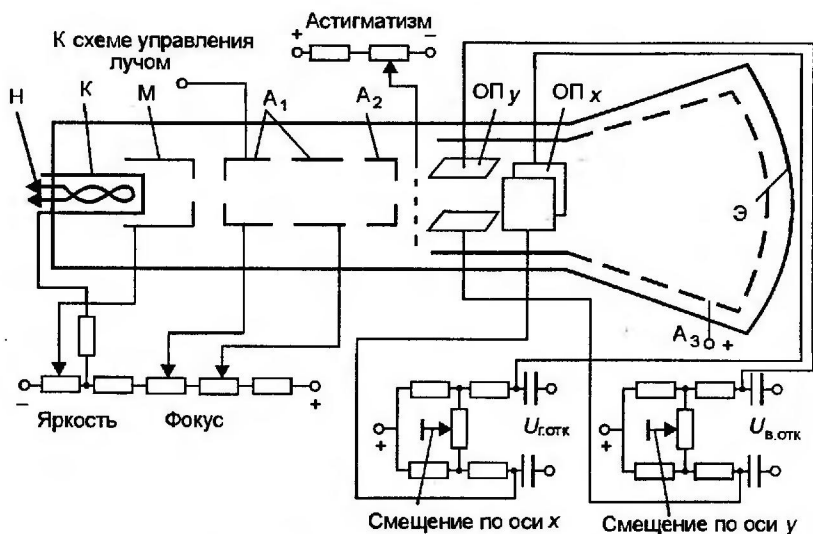


Рис. 8.2. Устройство электронно-лучевой трубки

и ОП_y и под действием напряжений, приложенных к этим пластинам, отклоняется соответственно по осям координат X и Y , вызывая смещение светящегося пятна на экране трубки. Напряжение, приложенное к пластинам, можно изменять и тем самым смещать луч по экрану. (На рис. 8.2 показана упрощенная схема управления начальной установкой луча.) Анод A_3 предназначен для дополнительного ускорения электронов. Такая необходимость возникает при исследовании сигналов с малой частотой повторения или одиночных импульсов, когда электронный луч не успевает возбудить в достаточной мере люминофор и яркость свечения может оказаться недостаточной. На анод A_3 подается большое положительное напряжение.

Таким образом, как следует из принципа действия ЭЛТ, при подаче переменного напряжения на вертикально отклоняющие пластины светящееся пятно на экране будет перемещаться по вертикали. Если это перемещение будет достаточно быстрым (например, $f \geq 50$ Гц), то на экране получится вертикально светящаяся прямая.

При подаче переменного напряжения на горизонтально отклоняющие пластины на экране образуется горизонтальная светящаяся линия.

При подаче сигнала на обе пары пластин будет одновременное отклонение светящегося пятна по вертикали и горизонтали, а на экране осциллографа высвечивается рисунок, который называется осциллограммой. Вид осциллограммы зависит от характера прикладываемых к пластинам сигналов.

Для упорядоченного наблюдения исследуемого сигнала (прикладываемого к вертикальным пластинам) в прямоугольной системе координат на горизонтально отклоняющие пластины подается чаще всего на-

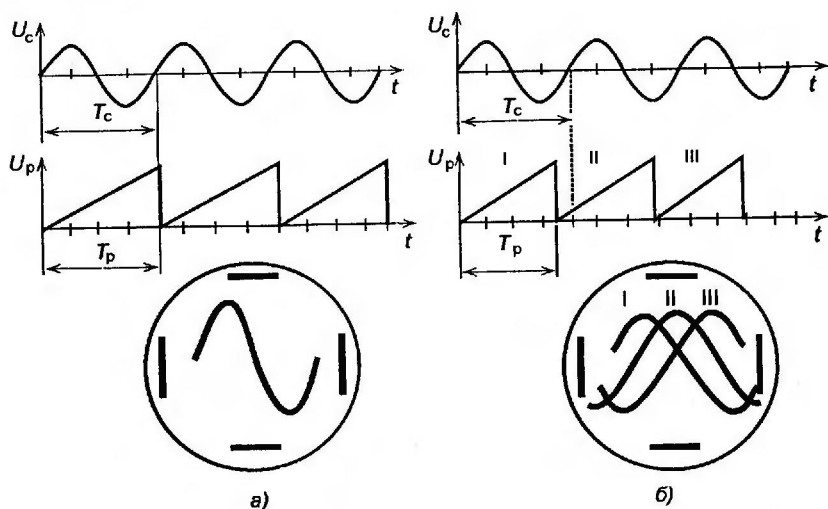


Рис. 8.3. Формирование осциллограммы: а — при $T_p = T_c$; б — при $T_p < T_c$

пряжение U_p , линейно меняющееся во времени (рис. 8.3, а). Светящееся пятно в этом случае будет перемещаться по экрану горизонтально с постоянной скоростью.

Сигнал (напряжение), обеспечивающий горизонтальное движение луча, называют развертывающим, а след, образуемый лучом на экране ЭЛТ под действием развертывающего напряжения, принято называть разверткой.

Рассмотрим процедуру образования изображения на экране ЭЛТ при воздействии на пластины синусоидального исследуемого сигнала (U_c) и линейного напряжения развертки (U_p). При этом, если период пилообразного напряжения развертки (T_p) равен периоду сигнала (T_c), а длительность обратного хода равна нулю, то после окончания первого цикла развертки светящееся пятно мгновенно возвращается в исходное положение, а последующие циклы развертки изображения будут накладываться на одни и те же места экрана, в результате изображение будет неподвижным.

Если $T_p \neq T_c$, то изображение сигнала не будет оставаться неподвижным. Несложно проследить (рис. 8.3, б), что в этом случае будет создаваться ощущение движения изображения в одну или другую сторону в зависимости от соотношения $T_c < T_p$ или $T_c > T_p$.

Таким образом, для обеспечения устойчивого изображения необходимо выполнить условие $T_p = T_c$.

Изображение также останется устойчивым, если $T_p = nT_c$. В этом случае в одном периоде развертки будет укладываться n периодов сигнала.

Конструктивно обеспечить равенство периода сигнала и напряжения развертки длительное время сложно из-за ограниченной стабильности

генераторов развертки. Принципиальное решение этой задачи возможно лишь при синхронизации сигнала развертки исследуемым сигналом.

8.3. Структурная схема осциллографа

Схему универсального осциллографа можно представить состоящей из следующих основных компонентов (рис. 8.4):

- электронно-лучевая трубка;
- канал вертикального отклонения луча Y (КВО);
- канал горизонтального отклонения луча X (КГО);
- канал управления и модуляции луча по яркости;
- калибраторы.

8.3.1. Канал вертикального отклонения

Этот канал обеспечивает передачу исследуемого сигнала от входа осциллографа до пластин Y с минимальными допустимыми искажениями и с уровнем, обеспечивающим его изображение во весь экран ЭЛТ.

В состав канала Y входят входное устройство, состоящее из разделительного конденсатора и аттенюатора; линия задержки; усилители канала вертикального отклонения (УВО).

Коммутируемый разделительный конденсатор подключается к схеме через переключатель S_1 . При отключении конденсатора обеспечивается наблюдение на экране осциллографа полного сигнала, т.е. его постоянной и переменной составляющих (вход «Открыт», условное обозначение « $\sim$ »). При подключении конденсатора обеспечивается наблюдение только переменной составляющей сигнала (вход «Закрит», условное обозначение « $\sim$ »). Заметим, что в осциллографах, где в канале вертикального отклонения используются усилители постоянного тока, разделительного конденсатора нет и вход КВО непосредственно соединен со входом усилителя, который имеет непосредственные связи между каскадами.

Аттенюатор (входной делитель напряжения) предназначен для калиброванного ступенчатого ослабления уровня входного сигнала в целое число раз, т.е. он позволяет установить уровень исследуемого сигнала таким, чтобы первый каскад усилителя работал в линейном режиме и вносил минимальные нелинейные искажения. Аттенюатор обеспечивает также высокое входное сопротивление и малую входную емкость. Переключатель аттенюатора обычно имеет несколько фиксированных положений, обозначаемых отношением «Вольт/дел». Если осциллограф предназначен для исследования широкополосных импульсных сигналов, то наряду с высокоомным входом предусматривается и низкоомный (50 или 75 Ом), представляющий собой нагрузку для коаксиального кабеля, по которому передается исследуемый сигнал.

Усилитель канала вертикального отклонения обеспечивает усиление исследуемого сигнала до величины, удобной для его наблюдения

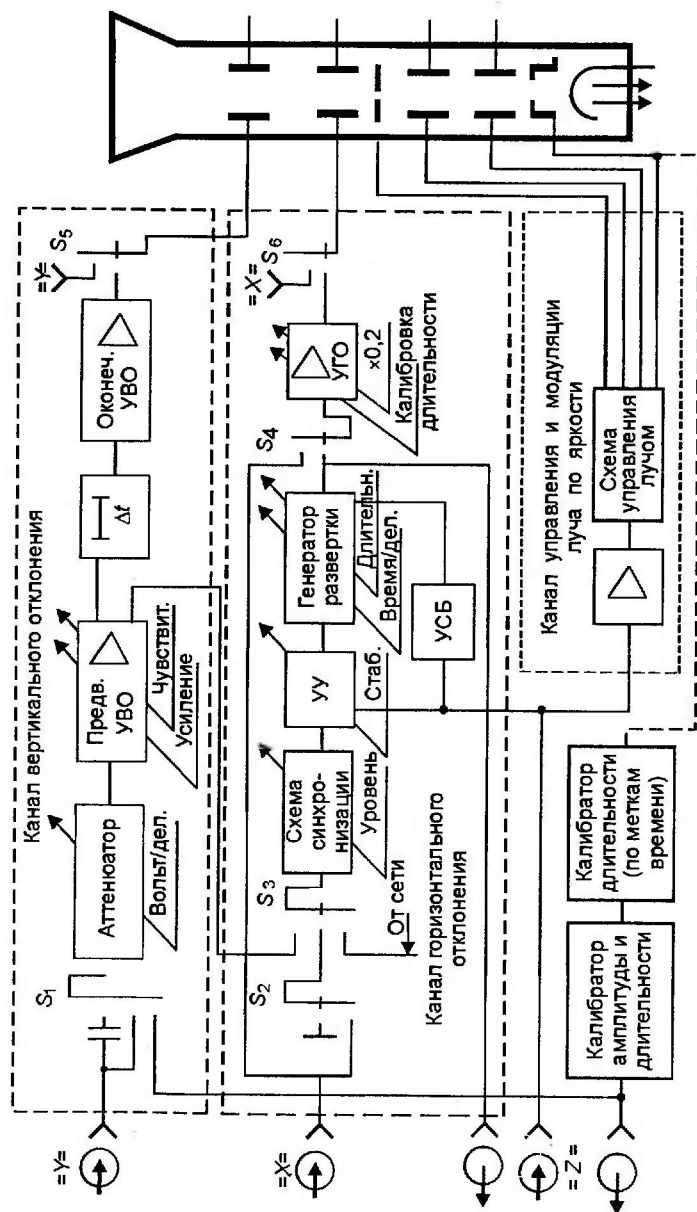


Рис. 8.4. Структурная схема универсального осциллографа

на экране ЭЛТ, и тем самым повышает чувствительность осциллографа. В усилителе канала вертикального отклонения обычно выделяют два каскада:

- предварительный усилитель канала вертикального отклонения (Предв. УВО);
- оконечный усилитель канала вертикального отклонения (Оконеч. УВО).

Предварительный усилитель канала вертикального отклонения предназначен для усиления исследуемых сигналов в полосе пропускания осциллографа при минимальных допустимых амплитудных, частотных и фазовых искажениях. В предварительном усилителе, как правило, осуществляется плавное регулирование коэффициента усиления (потенциометры «Чувствит.» и «Усиление»). Выходной каскад предварительного усилителя нагружается на низкоомную линию задержки, поэтому его выходное сопротивление также низкоомное, т.е. обеспечивается согласование его выходных параметров с параметрами линии задержки.

Оконечный усилитель канала вертикального отклонения предназначен для создания двух симметричных противофазных напряжений, достаточных для отклонения луча ЭЛТ в пределах экрана по вертикали. Такие усилители (каскады усилителей) называют парофазными. Они обеспечивают постоянство потенциала средней линии между пластинами при изменяющемся размере исследуемого сигнала. Оконечный усилитель работает на емкостную нагрузку, состоящую из параллельно соединенных емкостей отклоняющих пластин ЭЛТ и паразитных емкостей монтажа.

Линия задержки обеспечивает наблюдение переднего фронта импульсного сигнала при запуске развертки самим исследуемым сигналом. В этом случае генератор развертки осциллографа вследствие своей инерционности вырабатывает линейное пилообразное развертывающееся напряжение с некоторым запаздыванием $t_{\text{зап}}$ по отношению к исследуемому (запускающему) импульсу. Это приводит к тому, что начальная часть импульса не будет развернута на экране (рис. 8.5, а).

Для устранения указанного недостатка нужно, чтобы сигнал развертки поступал на пластины X раньше, чем исследуемый сигнал на пластины Y . Для этого последний нужно задержать на некоторый интервал $t \geq t_{\text{зап}}$. Эта задержка осуществляется с помощью линии задержки (рис. 8.5, б). Линия задержки должна быть достаточно широкополосной, не иметь неоднородностей и хорошо согласовываться с предшествующим и последующим каскадами схемы. Общее требование к линии задержки — не вносить искажений в КВО.

Рассмотренная типовая схема КВО в некоторых осциллографах усложняется, что позволяет расширить их измерительные возможности. Чаще применяют двухканальные схемы и КВО с дифференциальным усилителем.

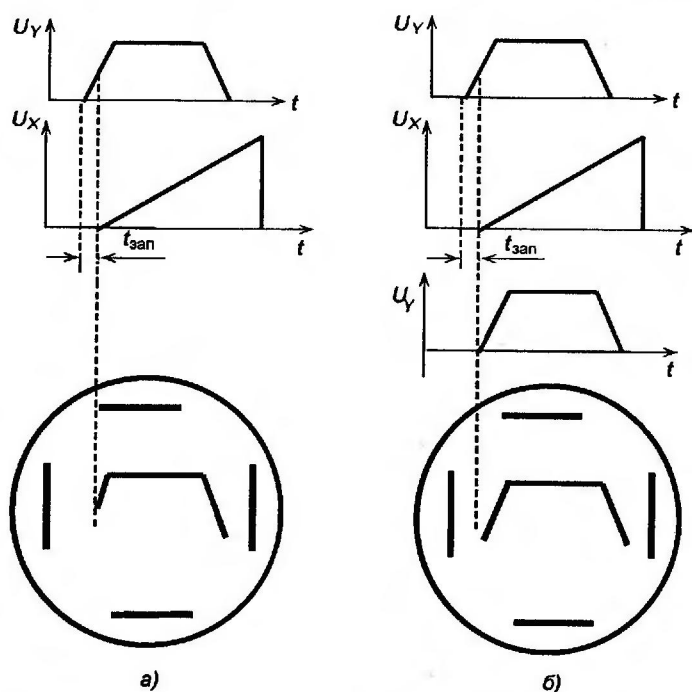


Рис. 8.5. Временные диаграммы: а — при отсутствии линии задержки; б — при наличии линии задержки

Двухканальные осциллографы имеют две отдельные входные цепи, которые поочередно коммутируются к усилителю вертикального отклонения (рис. 8.6).

Обычно используют два режима коммутации каналов А и Б: режим попеременного доступа («попеременно») и режим прерывания («прерывисто»).

В режиме попеременного доступа электронный коммутатор меняет каналы А и Б, подключая их поочередно через один цикл горизон-

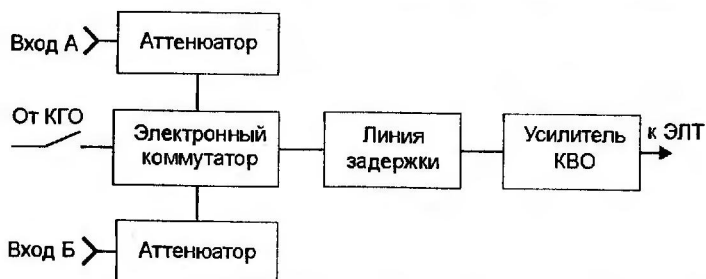


Рис. 8.6. Входные цепи двухканального осциллографа с электронным коммутатором



Рис. 8.7. Входные цепи двухканального осциллографа с дифференциальным усилителем

тальной развертки. Если длительность развертки значительно меньше времени послесвечения ЭЛТ, то на экране обеспечивается стабильное изображение сигналов в каналах А и Б. В этом режиме коммутатор обычно синхронизируется от генератора развертки канала горизонтального отклонения.

В режиме прерывания коммутатор работает без синхронизации с высокой частотой (от 100 до 500 кГц). Каналы А и Б при этом переключаются многократно за время одного прямого хода развертки. В результате небольшие фрагменты сигналов в каналах А и Б подключаются попеременно к усилителю вертикального отклонения и отображаются на экране ЭЛТ.

Каналы вертикального отклонения с дифференциальным усилителем (ДУ) реализуют в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 8.7.

При подаче на входы осциллографа двух сигналов различной амплитуды на выходе дифференциального усилителя получается один сигнал, пропорциональный разности этих амплитуд.

Такое свойство ДУ позволяет исследовать сигнал по частям. На один вход подается исследуемый сигнал, а на второй вход — постоянное напряжение, величину которого можно менять. Изменяя величину постоянного напряжения, можно выделить необходимый участок сигнала, так как на экране трубки будет воспроизводиться та часть исследуемого сигнала, которая по амплитуде близка к уровню постоянного напряжения.

Осциллограф с дифференциальным усилителем позволяет также исследовать сигналы при значительном уровне помех. На один вход КВО подается сигнал с помехой, а на другой вход — только помеха. В результате исследуемый сигнал усиливается, а помеха подавляется.

8.3.2. Канал горизонтального отклонения

Канал горизонтального отклонения (КГО) X называют также каналом развертки. Он предназначен для создания или усиления сигнала, вызывающего горизонтальное перемещение луча с заданной скоро-

стью. При этом напряжение развертки может создаваться как генератором, входящим в состав КГО, так и подаваться от внешнего источника. В обоих случаях напряжение развертки усиливается усилителем канала горизонтального отклонения (УГО) и подается к горизонтальным отклоняющим пластинам.

В зависимости от формы развертывающего напряжения, а также схемы подачи этого напряжения на горизонтально отклоняющие пластины различают линейную (пилообразную), синусоидальную и круговую развертки.

Основным видом развертки является линейная. Она реализуется путем подачи на горизонтально отклоняющие пластины линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения. При этом изображение сигнала на экране получается в прямоугольной декартовой системе координат, удобной для наблюдения.

Основными элементами КГО в большинстве осциллографов являются схема синхронизации, узел управления, генератор развертки, усилитель канала горизонтального отклонения (см. рис. 8.4).

Генератор развертки является важнейшим элементом КГО. Он предназначен для получения пилообразного напряжения развертки, подаваемого через УГО на горизонтально отклоняющие пластины. Принцип построения и схемная реализация генератора развертки могут быть различными (см. рис. 8.5). Одним из важнейших требований к генераторам пилообразного напряжения (ГПН), используемым в осциллографах, является линейность прямого хода. Чем линейнее развертка, тем точнее воспроизведение исследуемого процесса и тем меньше погрешность измерений. Процесс влияния линейности на качество изображения исследуемого сигнала поясняется рис. 8.8.

Длительность прямого хода развертки $t_{пр}$ определяет скорость движения луча в горизонтальном направлении и влияет на яркость свечения осциллограммы.

В большинстве ГПН ступенчатое изменение длительности развертки осуществляется переключателем, который принято обозначать «Время/дел.» и градуировать мс/дел. или мкс/дел. Плавная регулировка длительности внутри диапазона обычно осуществляется потенциометром «Длительность». Калиброванная развертка, т.е. когда отклонению луча по горизонтали соответствует строго определенная длительность, осуществляется при фиксированном положении потенциометра «Длительность».

Размер изображения сигнала на экране ЭЛТ по горизонтали пропорционален амплитуде пилообразного напряжения. Амплитуда напряжения развертки должна быть достаточной для отклонения луча на всю ширину ЭЛТ.

Усилитель горизонтального отклонения (УГО) предназначен для усиления напряжения развертки до уровня, обеспечивающего получение

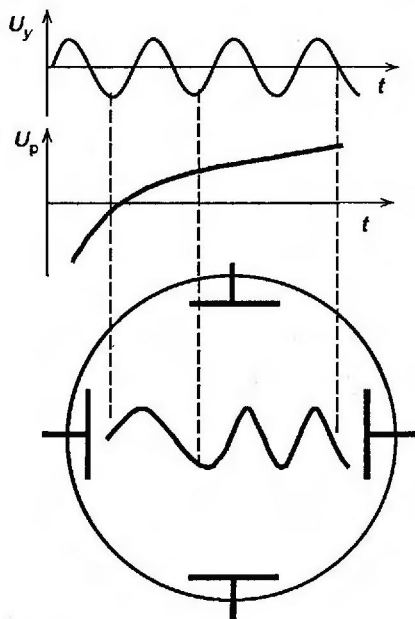


Рис. 8.8. Влияние линейности развертки на качество осциллограммы

развертки во весь экран. Кроме того, УГО может усиливать сигналы развертки, подаваемые непосредственно на вход канала горизонтального отклонения. В этом случае собственный генератор развертки отключается.

В УГО обычно размещают некоторые органы управления работой осциллографа. Так, в большинстве осциллографов в УГО осуществляется фиксированное изменение усиления напряжения развертки в число раз, равное коэффициенту умножения (переключатель «Умножение»), а также плавное изменение усиления при калибровке КГО подстрочными элементами.

В **схеме синхронизации** формируются короткие однополярные импульсы с периодом следования, равным или кратным периоду синхронизирующего сигнала. Для этого в схеме синхронизации имеются специальные формирующие каскады. В зависимости от того, какой источник сигнала с помощью переключателя используется для формирования импульсов, запускающих (синхронизирующих) генератор развертки, различают три вида (рода) синхронизации: внутреннюю, внешнюю, от сети.

При **внутренней синхронизации** источником синхросигнала служит сам исследуемый сигнал, который подается из КВО. При **внешней синхронизации** управление разверткой осуществляется от внешнего источника, сигнал которого подается на вход КГО.

При **синхронизации от сети** источником сигнала синхронизации генератора развертки служит напряжение сети электропитания осциллографа.

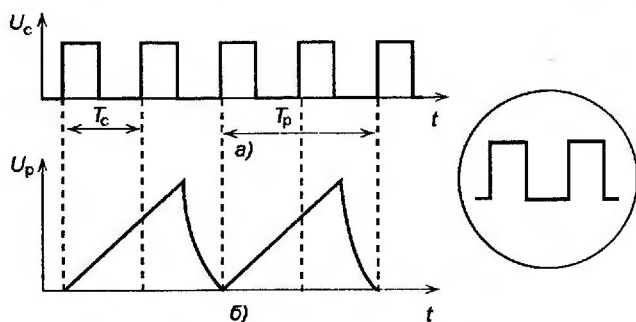


Рис. 8.9. Осциллограмма при линейной развертке

В схеме синхронизации имеется, как правило, переключатель полярности синхросигнала и усилитель с регулятором уровня запускающего напряжения (потенциометр «Уровень»). Запускающее напряжение определяет уровень срабатывания каскадов, формирующих импульсы запуска на выходе схемы синхронизации.

Управляющее устройство (УУ) предназначено для формирования импульсов, управляющих работой генератора развертки. Схемная реализация УУ может быть различной. Чаще всего это мультивибратор или триггер, вырабатывающий прямоугольные импульсы. В современных осциллографах обычно используются универсальные УУ, работающие в непрерывном и ждущем режимах. Перевод УУ в ждущий или непрерывный режим работы обычно осуществляется плавно с помощью регулятора «Стабильность».

Устройство сравнения и блокировки (УСБ) предназначено для блокировки работы УУ на время существования переходных процессов в генераторе развертки после окончания в нем цикла формирования линейного развертывающего напряжения. В результате подачи сигнала с УСБ на УУ последнее не реагирует на запускающие импульсы, поступающие из схемы синхронизации, и находится в исходном состоянии до окончания обратного хода ($T_{обр}$) и переходного процесса в генераторе развертки.

Динамику работы КГО рассмотрим в наиболее характерных режимах развертки.

В автоколебательном непрерывном режиме генератор развертки работает непрерывно вне зависимости от наличия сигнала. Этот режим используется для наблюдения сигналов с небольшой скважностью или для наблюдения одного или нескольких периодов сигнала.

Пример осциллограммы при подаче на вход осциллографа последовательности импульсов (рис. 8.9, а) и линейной периодической развертке (рис. 8.9, б) показан на рис. 8.9, в.

Процесс синхронизации для данного случая рассмотрим на примере, когда в качестве устройства управления используется мультивибратор, синхронизируемый короткими импульсами [55].

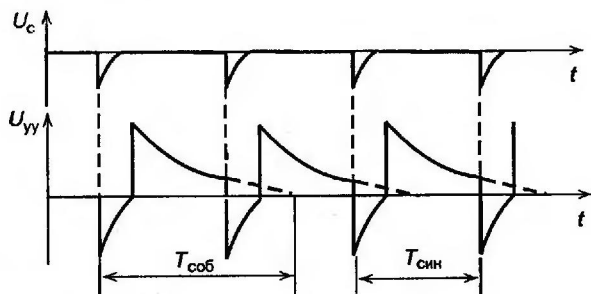


Рис. 8.10. Временные диаграммы процесса синхронизации

Импульсы синхронизации отрицательной полярности поступают на вход синхронизации мультивибратора.

Период собственных колебаний ($T_{\text{соб}}$) мультивибратора устанавливается больше периода следования синхроимпульсов ($T_{\text{син}}$), и поэтому синхроимпульсы вынуждают мультивибратор опрокидываться в моменты прихода импульсов.

Действительно, в момент поступления отрицательного синхроимпульса U_c на вход синхронизации в мультивибраторе наступает релаксационный процесс, и период колебаний мультивибратора укорачивается и становится равным периоду следования синхроимпульсов (рис. 8.10).

Для устойчивой осциллограммы нужно обеспечить необходимое соотношение между $T_{\text{соб}}$ и $T_{\text{син}}$, а также правильно выбрать величину импульса синхронизации.

Указанные параметры подбирают обычно экспериментально при работе с осциллографом. Вначале при минимальном напряжении синхронизации подбирают $T_{\text{соб}}$, примерно равный периоду исследуемого сигнала, а затем при замедлении движения осциллограммы вводят сигнал синхронизации. Поочередно подбирая $T_{\text{соб}}$ и U_c , добиваются полного синхронизма, т.е. устойчивого изображения осциллограммы.

Рассматриваемый режим непрерывной работы генератора развертки практически не пригоден для наблюдения импульсов с большой скважностью. Действительно, если период развертки делать равным периоду следования сигнала, то изображение импульса будет узким. Если же период развертки соизмерим с длительностью импульса, то изображение будет бледным и неустойчивым, что объясняется тем, что за период повторения импульсов совершается много пробегов луча, но лишь один совпадает с исследуемым импульсом и отображает его. Для наблюдения сигналов с большой скважностью, а также непериодических и однократных сигналов в осциллографах обычно предусматривается ждущий режим работы.

В ждущем режиме генератор линейной развертки начинает работать только при появлении на входе осциллографа исследуемого сигнала (на рис. 8.11 входной сигнал $U_{\text{сиг}}$ показан с учетом задержки $t_{\text{лз}}$).

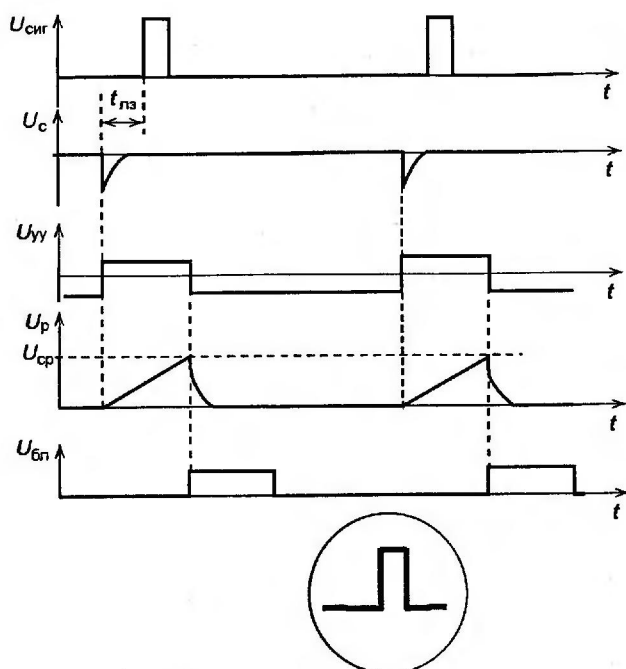


Рис. 8.11. Временные диаграммы работы КГО в ждущем режиме

Под воздействием входного сигнала с выхода схемы синхронизации на управляющее устройство поступают запускающие импульсы (U_c), которые переводят УУ из исходного состояния в рабочее. Управляющее устройство вырабатывает прямоугольный импульс (U_{yy}), а в генераторе развертки начинает нарастать напряжение прямого хода (U_p). Длительность прямоугольного импульса определяет время прямого хода луча (см. рис. 8.11).

Сигнал пилообразной формы поступает на УГО и одновременно на узел блокировки. При достижении пилообразным импульсом установленного уровня сравнения ($U_{ср}$) управляющее устройство возвращается в исходное состояние и прямой ход прекращается. В устройстве формирования начинается спад напряжения (обратный ход), и оно также возвращается в исходное состояние. В связи с резким переходом от прямого хода к обратному в устройстве формирования пилообразных импульсов возникает переходный процесс, до окончания которого управляющее устройство не должно реагировать на запускающие импульсы, т.е. должно находиться в исходном состоянии. Это требование реализуется с помощью узла блокировки, где вырабатывается сигнал блокировки ($U_{бл}$), поступающий на узел управления. Процесс «торможения» перехода управляющего устройства от исходного состояния к рабочему называется блокировкой генератора развертки.

Таким образом, в ждущем режиме развертывающее напряжение вырабатывается только при наличии специального сигнала запуска. После того как под действием развертывающего напряжения луч совершает один прямой и один обратный ходы, генератор развертки прекращает работу и «ждет» прихода следующего импульса запуска.

Одноразовый режим обеспечивает одиночный запуск развертки. Этот режим используется для наблюдения одиночных и непериодических сигналов. Для фиксации результатов применяется фотографирование или трубка с большим послесвечением.

Рассмотренные режимы работы КГО анализировались для случая линейной развертки. При проведении некоторых исследований с помощью осциллографа на его горизонтальные пластины подают не пилообразное, а синусоидальное напряжение $U_x \sin \omega t$, т.е. осуществляется синусоидальная развертка. В этом случае, как и при линейной развертке, линия развертки представляет собой горизонтальную линию, но скорость перемещения луча изменяется по синусоидальному закону. Мгновенное значение отклонения луча по горизонтали

$$x(t) = U_x h_x \sin \omega t = a \sin \omega t,$$

где a — амплитуда отклонения луча по горизонтали.

Синусоидальная развертка представляет практический интерес, когда на вертикально отклоняющие пластины также подается синусоидальный сигнал U_y , сдвинутый по фазе относительно U_x на угол φ . В этом случае на экране ЭЛТ появляется фигура Лиссажу, форма которой зависит от амплитуд отклонений электронного луча по вертикали, горизонтали, начальной фазы одного из напряжений и описывается равенством [25]

$$y = \frac{b}{a} \left(x \cos \varphi + \sqrt{a^2 - x^2} \sin \varphi \right), \quad (8.5)$$

где b — амплитуда отклонения луча по вертикали.

Формула (8.5) является уравнением эллипса, т.е. фигура Лиссажу на экране в рассматриваемом случае — эллипс.

В зависимости от фазового сдвига между отклоняющими напряжениями U_x и U_y форма и наклон эллипса будут изменяться:

- если $\varphi = 0$, то $y = (b/a)x$;
- если $\varphi = 180^\circ$, то $y = -(b/a)x$;

т.е. в этих случаях эллипс вырождается в прямые, наклоненные под углом к оси x :

$$\varphi = \arctg(\pm b/a).$$

При $a = b$ прямые наклоняются под углом 45° или 135° к горизонтальной оси соответственно;

- если $\varphi = 90^\circ$ или 270° , то $(x^2/a^2) + (y^2/b^2) = 1$. Это уравнение эллипса с полуосями, совпадающими с осями координат. При

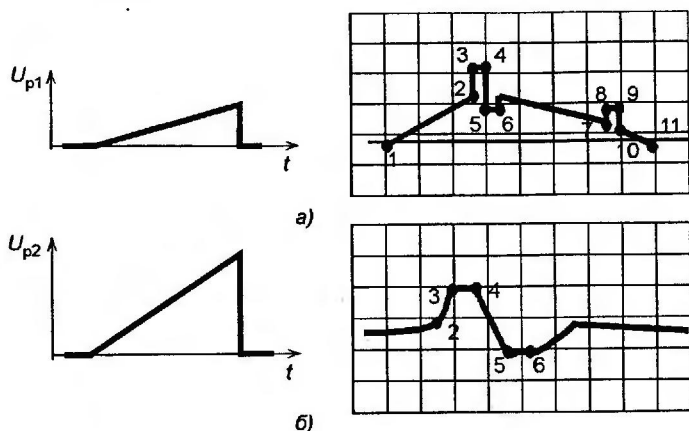


Рис. 8.12. Иллюстрация растянутой развертки

$a = b = r$ осциллограмма принимает вид окружности с радиусом r ($x^2 + y^2 = r^2$) (см. табл. 8.1).

Таким образом, форма и наклон эллипса являются признаками фазового сдвига между отклоняющими напряжениями. Если сигналы U_y и U_x имеют неравные частоты и начальные фазы, то фигуры Лиссажу принимают более сложный вид. Синусоидальная развертка применяется для измерения частоты, фазового сдвига, параметров модулированных колебаний и других величин.

Для измерения фазового сдвига и сравнения частот двух сигналов часто используется *круговая (эллиптическая) развертка*, полученная на основе синусоидальной. Для этого на входы осциллографа подаются гармонические сигналы от одного источника, но сдвинутые по фазе на 90° с помощью фазовращающей цепочки. На экране осциллографа получается осциллограмма в виде окружности или эллипса — линия круговой развертки.

Здесь важно отметить, что в течение периода развертывающего напряжения светящееся пятно делает один оборот по окружности, т.е. число оборотов в секунду равно частоте развертывающего напряжения. В процессе исследования с использованием круговой развертки входной сигнал подается, как правило, на модулятор ЭЛТ через канал Z .

Кроме рассмотренных типовых режимов работы КГО, в практике осциллографических измерений возникает необходимость применения специальных разверток, например для детального рассмотрения отдельных участков исследуемого сигнала. Рассмотрим некоторые из этих режимов [14].

Растянутая развертка реализуется за счет дополнительного усиления напряжения генератора развертки (рис. 8.12). При этом часть осциллограммы может выходить за пределы экрана, но путем смещения

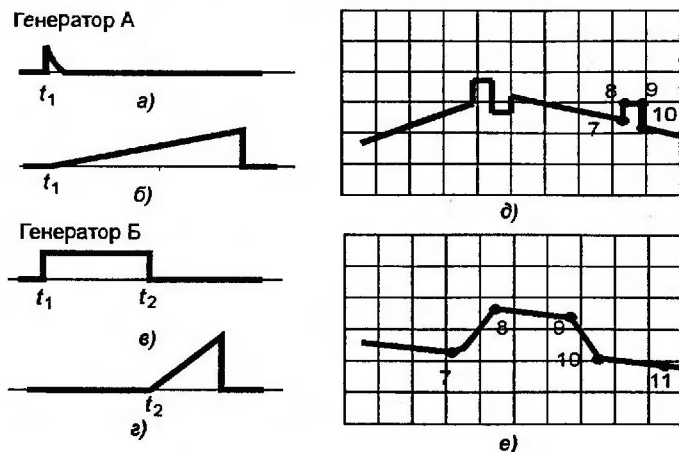


Рис. 8.13. Иллюстрация задержанной растянутой развертки

луча по горизонтали устанавливается изображение части сигнала, подлежащей детальному изучению.

Задержанная растянутая развертка реализуется с использованием двух генераторов развертки КГО. В этом режиме основная развертка запускается импульсом в момент t_1 (рис. 8.13,а), а момент запуска быстрой развертки t_2 определяется регулируемым уровнем запуска, т.е. задержка запуска второго генератора развертки регулируется, что позволяет выбирать участок для детального изучения (растяжки во времени). В данном случае на экране просматривается только растянутый сигнал за счет генератора Б, а генератор развертки А используется как генератор времени задержки.

Если момент t_2 (рис. 8.13,а, б, в) предшествует точке 7 (рис. 8.13,в), то сигнал на экране осциллографа в режиме задержанной растянутой развертки будет иметь вид, показанный на рис. 8.13,е.

Задержанная развертка может быть реализована и другим способом. Приходящий сигнал (рис. 8.13,а) запускает устройство задержки, а в конце импульса задержки (рис. 8.13,в) включается генератор развертки. Регулируя величину задержки, как и в рассмотренном случае, можно перемещать растянутый участок изображения и рассматривать различные части сигнала.

8.3.3. Канал управления и модуляции луча по яркости (канал Z)

Этот канал предназначен выполнять следующие функции:

- установку требуемой яркости свечения луча ЭЛТ;
- подсветку (гашение) развертки во время прямого (обратного) хода луча;
- модуляцию по яркости изображения сигнала.

Управление яркостью свечения луча ЭЛТ и его фокусировкой осуществляется вручную (см. рис. 8.2) ручками «Яркость», «Фокус», а также потенциометром «Астигматизм» путем изменения уровня напряжения на соответствующих электродах трубки.

«Подсветка» развертки осуществляется во время прямого хода луча для получения более яркого его изображения, а «гашение» развертки — во время обратного хода луча с тем, чтобы обратный ход развертки не просматривался на изображении сигнала. «Подсветка» и «гашение» (блокирование) осуществляются автоматически путем подачи на электроды ЭЛТ (модулятор) импульсов напряжения соответствующей полярности. Импульсы должны совпадать по времени с прямым (подсвет) и обратным (гашение) ходами луча. Исходным сигналом для формирования импульсов служит генератор развертки, который функционально связан с электродами ЭЛТ через усилитель канала Z . Использование подсветки (гашения) особенно важно при работе КГО в ждущем режиме.

Модуляция луча по яркости свечения производится внешним сигналом и позволяет наблюдать у сложных сигналов только те его части, которые совпадают по времени с внешним сигналом. Для подключения внешнего модулирующего сигнала в осциллографах, как правило, предусматривается специальный вход, называемый входом Z .

Заметим, что имеются электронно-лучевые трубки, у которых луч не гасится, а выводится за пределы экрана с помощью дополнительных (блокирующих) пластин, входящих в состав электронной пушки.

8.3.4. Калибраторы уровня и временных интервалов

Практически в каждом осциллографе имеются калибраторы уровня (амплитуды) и временных интервалов (длительности). Указанные калибраторы представляют собой генераторы сигналов с точными значениями амплитуды и частоты.

Калибраторы уровня и временных интервалов предназначены для измерения уровня напряжения и временных параметров исследуемого сигнала методом сравнения, а также для проверки правильности калибровки шкалы переключателя коэффициента отклонения каналов вертикального и горизонтального отклонений луча.

Проверка правильности калибровки каналов осциллографа означает проверку их чувствительности к отклонению луча. Проверка осуществляется путем подачи на входы сигнала калибраторов и сравнения размера изображения этого сигнала с установленным значением соответствующего коэффициента отклонения по вертикали и горизонтали.

Часто один и тот же сигнал генератора используется для калибровки канала вертикального отклонения (калибровки коэффициента отклонения по амплитуде сигнала) и канала горизонтального отклонения (калибровки коэффициента развертки по времени).

8.4. Цифровые осциллографы

Одно из основных направлений совершенствования осциллографов основано на широком использовании в их схемах цифровых методов обработки сигналов и микропроцессоров. Структура построения современного цифрового осциллографа зависит от объема и характера функций, возложенных на используемую микропроцессорную систему.

Сравнительно простая схема цифрового осциллографа представлена на рис. 8.14. Это цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО) [33].

В момент t_i по команде микроконтроллера (МК) в АЦП начинается преобразование поступающего на его вход напряжения $U(t)$. В результате напряжение $U(t_i)$ преобразуется в числовой код и записывается в ячейку запоминающего устройства ЗУ. Процесс запоминания значений $U(t_i)$ продолжается до заполнения предназначенных для этого ячеек памяти ЗУ. При необходимости по команде МК из памяти ЗУ в определенной последовательности выбираются числа и подаются на ЦАП, где преобразуются в соответствующие напряжения $U(t_i)$. Далее эти напряжения через оконечный усилитель подаются на вертикально отклоняющие пластины. В результате при наличии разверток на экране отображается последовательность светящихся точек, а при наличии блока интерполяции — развернутая осциллограмма.

Функции генератора развертки в данной схеме может выполнять ЦАП, управляемый сигналами, поступающими на его вход от микроконтроллера. На выходе ЦАП образуется ступенчато изменяющееся напряжение, близкое к линейно изменяющемуся. Скорость развертки при этом определяется быстродействием ЦАП и микроконтроллера.

Современные ЦЗО обеспечивают практически неограниченное время хранения информации, возможность воспроизведения участков запоминаемого сигнала. Вместе с тем невысокое быстродействие АЦП ограничивает максимальную частоту исследуемых сигналов (40 МГц).

Более широкие возможности имеют цифровые осциллографы с программным управлением на основе микропроцессорных систем. Структура таких осциллографов подобна структуре вычислительных машин (рис. 8.15).

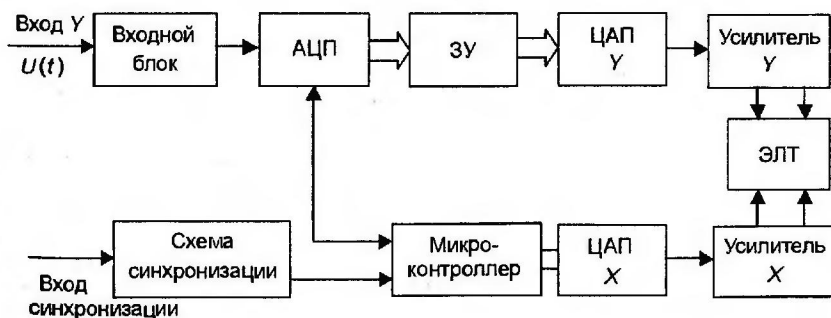


Рис. 8.14. Структурная схема цифрового запоминающего осциллографа

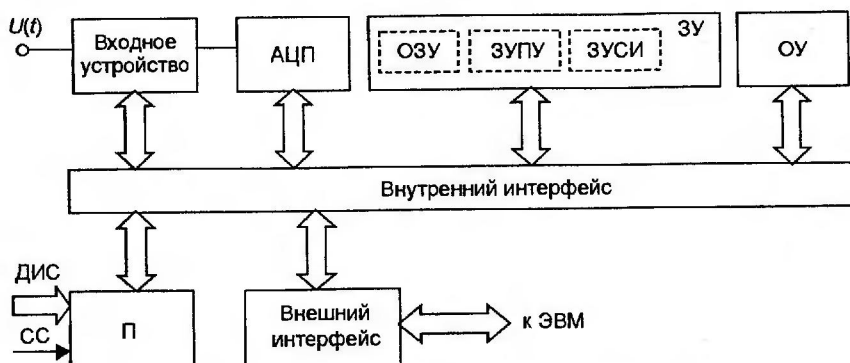


Рис. 8.15. Обобщенная структурная схема цифрового осциллографа с программным управлением

Исследуемый аналоговый сигнал $U(t)$ поступает на входное устройство, где осуществляется согласование его параметров с АЦП, а также автоматическое переключение каналов при многоканальном осциллографировании. Кроме того, здесь с помощью встроенных измерителей могут определяться амплитудные и временные параметры исследуемого сигнала.

После АЦП последовательность кодов информативных параметров сигнала через внутриприборный интерфейс подается в ЗУ, которое, как правило, включает в свой состав:

- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), обладающее высокой скоростью записи сигналов, следующих с частотой дискретизации;
- запоминающее устройство программ управления (ЗУПУ), обеспечивающее хранение программ математической и логической обработки результатов измерений и программ управления осциллографом;
- запоминающее устройство служебной информации (ЗУСИ), предназначенное для хранения выводимой на экран численно-буквенной и другой знаковой информации.

Из ЗУ сигналы поступают в процессор П, отображающее устройство или через внешний интерфейс на внешние устройства и ЭВМ.

В качестве процессора в цифровом осциллографе могут использоваться микропроцессорные комплекты, а также микро- и мини ЭВМ. Наличие микропроцессорной системы позволяет полностью автоматизировать работу осциллографа. Процессор осуществляет выбор и задание режимов работы осциллографа, обработку результатов измерения, связь осциллографа с оператором и внешними устройствами и другие операции.

На отображающих устройствах цифровых осциллографов можно наблюдать не только осциллограммы сигналов, но и численные значения ряда его параметров. Поскольку в рассматриваемом осциллографе имеется возможность измерять параметры сигналов на его входе, а не на

выходе канала вертикального отклонения как в аналоговых осциллографах, то численные значения параметров сигнала отображаются с высокой точностью.

Современные цифровые осциллографы при широком использовании микропроцессорных систем позволяют решать практически все функциональные задачи, возникающие при исследовании сигналов.

8.5. Измерение параметров сигналов с помощью универсального осциллографа

8.5.1. Измерение амплитудных параметров сигналов

Универсальный электронный осциллограф позволяет измерять значения постоянного, переменного и импульсного сигналов. Измерение осуществляется в амплитудных значениях напряжения электрического тока. При этом измеряемый сигнал подается на вход канала вертикального отклонения луча ЭЛТ.

Широкое распространение при измерении напряжений исследуемых сигналов получил метод калиброванной шкалы. Он основан на линейной зависимости между значением напряжения сигнала, поданного на вход канала, и размером его изображения на экране ЭЛТ (в мм, делениях шкалы). В этом случае при измерении напряжения путем изменения коэффициента отклонения $K_{\text{отк}}$ добиваются получения размера изображения сигнала l_x в пределах шкалы ЭЛТ и измеряют его. При откалиброванном усилителе вертикального отклонения измеренное напряжение вычисляют по формуле

$$U_x = l_x K_{\text{отк}}. \quad (8.6)$$

Например, $l_x = 3,5$ дел, $K_{\text{отк}} = 0,1$ В/дел, тогда $U_x = 0,35$ В. При данном измерении генератор развертки может быть отключен. Он включается при необходимости оценить форму исследуемого напряжения.

Погрешность измерения амплитудных параметров сигналов (напряжений) рассматриваемым методом составляет 5...10 %. Она определяется рядом факторов. Основными из них являются частотные и нелинейные искажения КВО, погрешность коэффициента отклонения, погрешность визуального отсчета и др. Одинаковые значения указанных искажающих факторов неодинаково проявляются при исследовании различных форм сигналов, поэтому дать единую количественную оценку их влияния затруднительно. Однако некоторые составляющие погрешности измерения напряжений можно исключить или учесть при обработке результатов измерений.

Систематическая погрешность, вызванная неравномерностью АЧХ КВО осциллографа, может быть учтена на основе известного аналитического выражения, описывающего частотную характеристику большин-

ства современных осциллографов:

$$A(f) = \exp[-0,35(f/f_B)]. \quad (8.7)$$

Исключить указанную систематическую погрешность можно через поправочный множитель $k = 1/A(f)$, определяемый по формуле (8.7) с учетом частоты измеряемого сигнала f и верхней граничной частоты КВО f_B .

Систематическая погрешность, вызванная подключением осциллографа в измеряемую цепь, по физической природе аналогична погрешности при подключении вольтметров (см. разд. 7.3).

Случайная относительная визуальная погрешность измерения импульсного напряжения, возникающая при снятии показаний с осциллографа, может быть определена по формуле [14]

$$\delta_{в.изм} \approx \frac{0,4b}{h} \cdot 100 \%, \quad (8.8)$$

где b — ширина луча, мм; h — размер изображения по вертикали, мм.

Полную приближенную относительную погрешность измерения амплитуды прямоугольных импульсов δ_{Π} принято определять по формуле

$$\delta_{\Pi} \approx \sqrt{\delta_{в.изм}^2 + \delta_{к.о}^2 + \delta_{н}^2}, \quad (8.9)$$

где $\delta_{к.о}$ — погрешность коэффициента отклонения, %; $\delta_{н}$ — погрешность из-за неравномерности переходной характеристики КВО, %.

Значения $\delta_{к.о}$ и $\delta_{н}$, как правило, приводят в технической документации конкретных осциллографов. Кроме того, обычно приводят данные о статистической погрешности измерения напряжения осциллографом δ_U для определенных размеров осциллограмм. Следует отметить, что погрешность δ_U значительно уменьшается с увеличением размеров осциллограммы на ЭЛТ, что следует учитывать при проведении измерений.

Более высокая точность измерения обеспечивается при использовании метода замещения (погрешность 1...3 %). В данном случае измерения осуществляются в два этапа. На первом этапе на ЭЛТ получают изображение исследуемого сигнала и измеряют его линейный размер l_x . На втором этапе измеряемый сигнал заменяют известным (калиброванным) напряжением U_K и, изменяя его, добиваются размера изображения калиброванного сигнала l_K , равного или кратного размеру изображения l_x ; тогда искомое значение напряжения сигнала находится по формуле

$$U_x = U_K(l_x/l_K). \quad (8.10)$$

В качестве калиброванного сигнала может использоваться собственный калибратор напряжения осциллографа или внешний источник. При использовании данного метода устраняется погрешность, вызванная нелинейностью КВО.

Для уменьшения погрешности измерения напряжения используется также компенсационный метод. При данном методе на вход уси-

лителя КВО подается исследуемый сигнал и регулируемое постоянное напряжение. Изменяя постоянное напряжение, добиваются смещения изображения исследуемого сигнала по вертикали на величину, равную амплитуде этого сигнала. Отсчет величины амплитуды сигнала проводится по показанию вольтметра, измеряющего изменения постоянного напряжения. При использовании данного метода также устраняется погрешность, вызываемая нелинейностью КВО.

8.5.2. Измерение временных параметров электрорадиотехнических сигналов

Под временными параметрами электрорадиотехнических сигналов понимаются период сигнала, длительность импульсов, длительность фронтов импульсов, интервал между импульсами и т.д.

Чаще всего измерение временных параметров сигналов осуществляют методом калиброванной шкалы и методом яркостных меток.

При измерениях методом калиброванной шкалы измеряемый сигнал подают в КВО и изменением положения переключателя коэффициента развертки K_p добиваются, чтобы измеряемая часть изображения сигнала занимала всю ширину экрана ЭЛТ, и измеряют линейный размер сигнала l_x . Искомое значение измеряемого временного интервала τ_x вычисляют по формуле

$$\tau_x = l_x K_p n_p, \quad (8.11)$$

где n_p — значение множителя растяжки развертки.

Например, при измерении длительности импульса $\tau_{\text{и}}$ его размер изображения $l_x = 2,4$ дел, $K_p = 0,5$ мкс/дел, $n_p = \times 0,1$, тогда $\tau_{\text{и}} = 0,12$ мкс.

Погрешность данного метода высокая и составляет обычно 5...10 %.

Как и при измерении амплитудных параметров, погрешность измерения временных параметров сигналов определяется несколькими факторами: погрешностью коэффициента развертки, нелинейностью временной развертки, погрешностью визуального отсчета и др.

Погрешность измерения длительности импульсов прямоугольной формы δ рекомендуется определить с учетом следующих частных погрешностей [26]: неточностью определения уровня 0,5 амплитуды импульса $\delta_{0,5U}$, визуальной погрешностью $\delta_{\text{виз}}$, погрешностью коэффициента развертки $\delta_{\text{кр}}$:

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{кр}}^2 + \delta_{0,5U}^2 + \delta_{\text{виз}}^2}, \quad (8.12)$$

где $\delta_{\text{виз}} = 0,4(b/l) \cdot 100$ %; $\delta_{0,5U} = \delta_{\text{виз}} \sqrt{\text{tg}^2 \alpha_1 + \text{tg}^2 \alpha_2}$; α_1 — угол между фронтом импульса и вертикалью; α_2 — угол между спадом импульса и вертикалью; l — размер изображения по горизонтали на уровне 0,5U мм.

Систематическая погрешность, связанная с конечным временем нарастания и спада переходной характеристики КВО осциллографа при измерении импульсов, длительность фронтов которых соизмерима со временем нарастания переходной характеристики, может быть устранена с учетом формулы (8.4).

Для уменьшения погрешности измерения временных параметров сигналов применяют метод сравнения измеряемого временного интервала с известным периодом T_k калиброванного сигнала. Если на измеряемой части изображения сигнала укладывается n меток, то измеряемый временной интервал $T_x = nT_k$.

8.5.3. Измерение частоты сигнала

Измерение частоты сигнала с помощью осциллографа производится методом сравнения с известной частотой сигнала, воспроизводимого мерой. При этом измерительную информацию получают с экрана ЭЛТ по изображению интерференционных фигур (фигур Лиссажу) или по числу изображений измеряемого сигнала на развертке.

Измерение частоты по интерференционным фигурам возможно для сигналов синусоидальной формы. Измерения проводят следующим образом. Измеряемый сигнал f_x подают на вход КВО, а сигнал меры известной частоты f_0 — на вход КГО для образования из него развертки. Медленным изменением частоты меры (образцового генератора) получают на экране ЭЛТ простейшую фигуру Лиссажу. При этом отношение частот сравниваемых сигналов определяют путем подсчета числа пересечений фигуры, мысленно проведенных горизонтальной и вертикальной линий, не проходящих через узлы фигуры.

Для неподвижного изображения фигуры справедливо соотношение

$$N_{\Gamma} f_0 = N_{\text{в}} f_x,$$

где N_{Γ} и $N_{\text{в}}$ — количество пересечений фигуры с горизонтальной и вертикальной линиями соответственно.

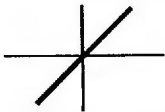
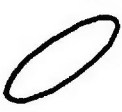
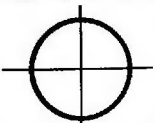
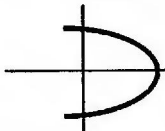
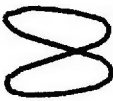
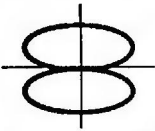
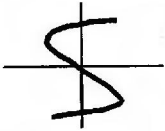
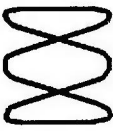
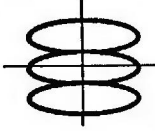
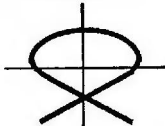
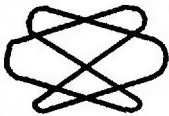
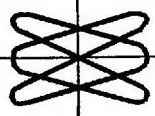
Из проведенного равенства определяется частота измеряемого сигнала $f_x = (N_{\Gamma}/N_{\text{в}})f_0$.

При измерениях рекомендуется стремиться к получению простейшей интерференционной фигуры — эллипса, для которой $f_x = f_0$. Примеры фигур Лиссажу приведены в табл. 8.1.

Измерение частоты повторений импульсных сигналов по числу изображений на линейной развертке производят при подаче измеряемого сигнала в КВО. Сигнал образцового генератора при этом подается на вход КГО для образования развертки. Медленным изменением частоты f_0 добиваются получения на экране ЭЛТ одного или n изображений сигналов. При этом частоту повторения импульсов сигналов f_x вычисляют по формуле $f_x = n f_0$.

Таблица 8.1

Фигуры Лиссажу

Соотношение частот	Сдвиг фаз		
	0	$\pi/4$	$\pi/2$
1 : 1			
1 : 2			
1 : 3			
2 : 3			

8.5.4. Измерение коэффициента амплитудной модуляции амплитудно-модулированного (АМ) сигнала

Напомним, что сигнал, модулированный по амплитуде, характеризуется коэффициентом модуляции M . Сущность рассматриваемого измерения состоит в том, что коэффициент модуляции определяется непосредственно по размерам изображения исследуемого АМ сигнала на экране ЭЛТ. Исследуемый сигнал подается на вертикальные отклоняющие пластины, а на горизонтальные пластины подается развертывающее напряжение. Для определения коэффициента модуляции используется одна из трех видов развертки: линейная, синусоидальная или эллиптическая (круговая).

При использовании линейной развертки, частота которой устанавливается в 2–3 раза меньше модулирующей частоты, и при подаче на вертикально отклоняющие пластины (канал «Y») исследуемого АМ сигнала осциллограмма имеет вид, показанный на рис. 8.16.

Коэффициент амплитудной модуляции M вычисляется в данном

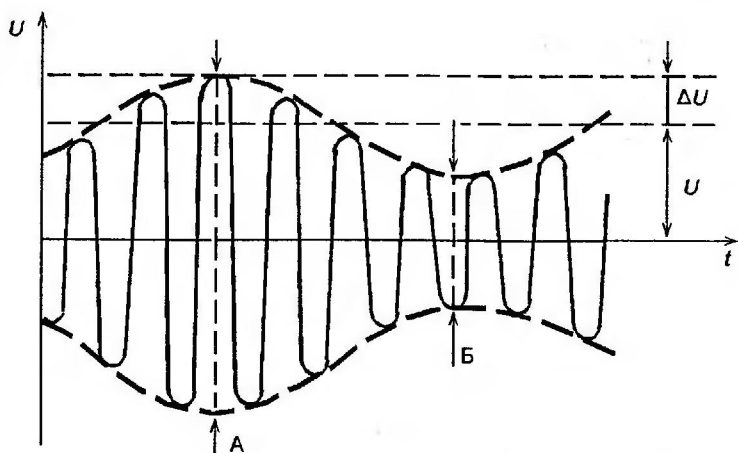


Рис. 8.16. Осциллограмма АМ сигнала при линейной развертке

случае по формуле

$$M = \frac{A - B}{A + B}, \quad (8.13)$$

где $A = 2U_{\max}$ — удвоенное максимальное значение модулированного сигнала; $B = 2U_{\min}$ — удвоенное минимальное значение модулированного сигнала.

Справедливость расчетной формулы очевидна из анализа рис. 8.16:

$$M = \frac{A - B}{A + B} = \frac{(2U + 2\Delta U) - (2U - 2\Delta U)}{(2U + 2\Delta U) + (2U - 2\Delta U)} = \frac{4\Delta U}{4U} = \frac{\Delta U}{U}.$$

При синусоидальной развертке в канал «Y» подается модулированный сигнал, а в канал «X» — модулирующее напряжение, которое можно контролировать. При этом на экране осциллографа появляется осциллограмма в виде светящейся плоскости в форме трапеции (рис. 8.17, а). Прямые, ограничивающие плоскость, являются фигурами Лиссажу, получающимися за счет взаимодействия огибающих модулированного сигнала с модулирующим напряжением при отсутствии сдвига фаз между ними.

При наличии нелинейных искажений осциллограмма может изменяться (рис. 8.17, б), при наличии фазового сдвига вместо прямых, ограничивающих фигуру, появляются эллипсы (рис. 8.17, в).

Если источник модулирующего напряжения недоступен, то на вход канала «X» подается продетектированное модулированное напряжение.

При эллиптической (круговой) развертке на входы каналов «X» и «Y» подается исследуемое модулированное напряжение с помощью фазосдвигающей цепочки ($\varphi = 90^\circ$). Генератор развертки выключается.

На экране получается эллипсоидальная фигура (рис. 8.18), в ну-

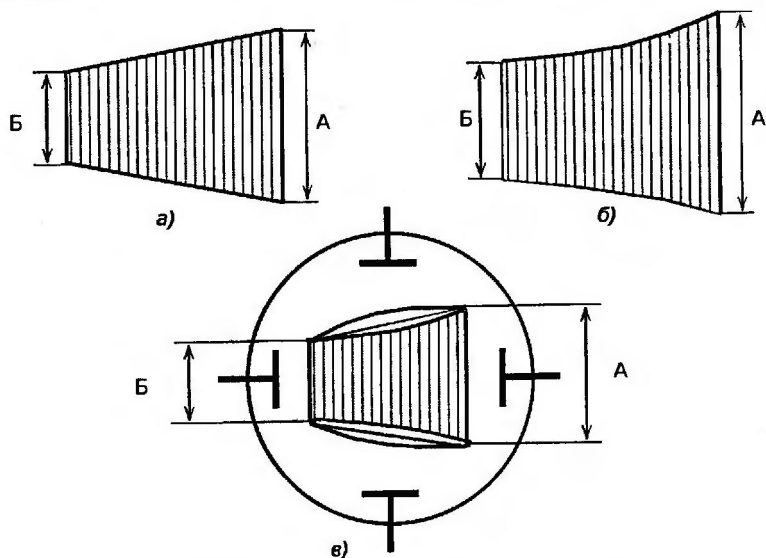


Рис. 8.17. Осциллограмма АМ сигнала при синусоидальной развертке

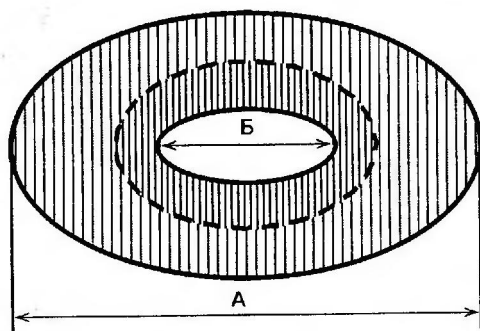


Рис. 8.18. Осциллограмма АМ сигнала при эллиптической развертке

трение и внешние размеры которой зависят от глубины амплитудной модуляции.

Коэффициент амплитудной модуляции определяется в соответствии с формулой (8.13) и рис. 8.17, 8.18.

Осциллографические методы просты, наглядны. Несущие частоты при этом ограничиваются полосой пропускания усилителей применяемого осциллографа. Погрешность измерения данным методом (из-за неточности отсчета по экрану осциллографа) достигает 8 %.

Заметим, что рассматриваемая методика измерения коэффициента модуляции возможна только при использовании в качестве модулирующего простого сигнала, например синусоидальной или прямоугольной формы. Если в качестве модулирующего использовать сложный

сигнал (например, речевой), то изменение коэффициента модуляции осциллографическим методом становится невозможно, так как наблюдается непрерывно меняющаяся картина модулированного сигнала. В этом случае нужно применять специальные приборы (вид С2), использующие в своей работе принцип выпрямления (детектирования) модулированного сигнала.

8.5.5. Измерение девиации частоты частотно-модулированного (ЧМ) сигнала

Данный метод основан на фиксации равенства нулю разности мгновенной частоты исследуемого сигнала и частоты вспомогательного сигнала.

Метод заключается в следующем. Исследуемый ЧМ-сигнал ($f_0 \pm \Delta f$) и сигнал поисковой частоты (f_r) поступают на смеситель (рис. 8.19). Напряжение их разностной частоты через ФНЧ подается на осциллограф. При этом в моменты равенства мгновенной частоты исследуемого и частоты поискового сигналов на экране осциллографа появляется характерная фигура с горизонтальным участком, что свидетельствует о выполнении равенства $f_r = f_0 + \Delta f$.

Поскольку значения сигналов поисковой частоты (f_r) и центральной частоты ЧМ сигнала (f_0) можно получить с высокой степенью точности, то и значение девиации частоты $\Delta f = f_r - f_0$ будет иметь очень малую погрешность.

Достоинство метода — нечувствительность результата измерения к форме сигнала огибающей, поэтому метод является предпочтительным для целей поверки (аттестации) измерителей пиковых значений девиации частоты. Погрешность измерения — менее 0,2 %.

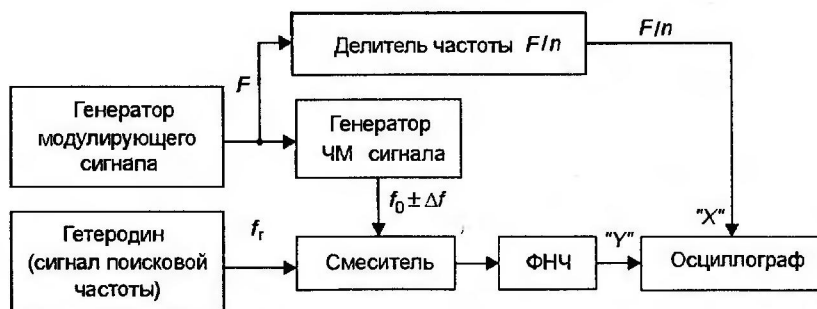


Рис. 8.19. Схема измерения ЧМ сигнала

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные характеристики осциллографов.
2. Как учесть влияние входного сопротивления и входной емкости осциллографа на погрешность измерения?

3. Назовите основное условие обеспечения устойчивости изображения на экране осциллографа.
4. Назовите основные элементы структурной схемы осциллографа.
5. Для чего предназначена линия задержки в канале вертикального отклонения осциллографа?
6. Назовите основные виды синхронизации в универсальном осциллографе. Для чего нужна синхронизация?
7. Когда используется синхронизация развертки?
8. Поясните процедуру калибровки КВО и КГО осциллографа.
9. Как осуществляется измерение частоты с помощью осциллографа?

Глава 9

Измерения частоты электрических сигналов

9.1. Общие сведения

Во многих областях науки и техники измерение частоты электромагнитных колебаний является одним из самых распространенных видов измерений.

Частотой колебаний называют число полных колебаний в единицу времени

$$f = n/t,$$

где t — время существования n колебаний.

Для периодических сигналов частота $f = 1/T$, где T — период колебаний, который определяется как наименьший интервал времени, через который повторяются мгновенные значения периодического сигнала.

Таким образом, частота — это физическая величина, численно равная числу идентичных событий в единицу времени.

Частота электромагнитных колебаний однозначно связана не только с периодом колебания T , но и с длиной однородной плоской волны в свободном пространстве λ :

$$f = c/\lambda,$$

где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в свободном пространстве; λ — длина волны, м.

Теоретически измерения частоты, времени и длины волны равноценны, но практически в большинстве случаев измеряют частоты, реже — интервалы времени. Длина волны при необходимости легко вычисляется, а на сверхвысоких частотах и измеряется.

Диапазон частот электрорадиотехнических сигналов, используемых в радиоэлектронных средствах различного назначения и подлежащих измерению, простирается от долей герца до тысяч гигагерц. В настоящее время спектр частот, применяемых для радиосвязи, радиовещания и телевидения упорядочен. Этот спектр разбит на девять полос, внутри которых частоты изменяются в 10 раз.

В соответствии с ГОСТ 24375-80 такое разделение частот по полосам и их метрические наименования приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Разделение частот по полосам и их метрические наименования

Номер полосы	Диапазон частот	Диапазон волн
4	3...30 кГц, очень низкие, ОНЧ	100...10 км, мириаметровый, СДВ
5	30...300 кГц, низкие, НЧ	10...1 км, километровый, ДВ
6	300...3000 кГц, средние, СЧ	1000...100 м, гектометровый, СВ
7	3...30 МГц, высокие, ВЧ	100...10 м, декаметровый, КВ
8	30...300 МГц, очень высокие, ОВЧ	10...1 м, метровый, УКВ
9	300...3000 МГц, ультравысокие, УВЧ	100...10 см, дециметровый, ДДМВ
10	3...30 ГГц, сверхвысокие, СВЧ	10...1 см, сантиметровый, СМВ
11	30...300 ГГц, крайне высокие, КВЧ	10...1 мм, миллиметровый, ММВ
12	300...3000 ГГц, гипервысокие, ГВЧ	1...0,1 мм, децимиллиметровый, ДЦММВ

Приборы для измерения частоты и времени согласно ГОСТ 150094-86 относят к группе, обозначаемой буквой «Ч», и по виду делят на следующие группы:

- Ч1 — стандарты частоты и времени;
- Ч2 — частотомеры резонансные;
- Ч3 — частотомеры электронно-счетные;
- Ч5 — синхронизаторы и преобразователи частоты;
- Ч6 — синтезаторы частоты, делители и усилители частоты;
- Ч7 — приемники сигналов эталонных частот и времени, компараторы частотные, фазовые, временные и синхрометры;
- Ч8 — преобразователи частоты в другие величины.

Приборы вида Ч4 — частотомеры гетеродинные, конденсаторные, мостовые — в настоящее время официально не выпускают. Однако следует заметить, что метод гетеродинного измерения частоты широко используется.

Наибольшее распространение в настоящее время получили следующие методы измерения частоты и временных интервалов: метод дискретного счета, метод сравнения (гетеродинный), резонансный и др.

9.2. Метод дискретного счета

Метод дискретного счета лежит в основе построения электронно-счетных частотомеров (ЭСЧ), используемых для измерения частотно-временных параметров электрических сигналов.

Сущность метода дискретного счета рассмотрим на основе анализа типовой структурной схемы ЭСЧ в различных режимах работы.

9.2.1. Цифровой частотомер

Упрощенная структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты представлена на рис. 9.1. Схема содержит следующие элементы: входное устройство ВУ, формирующее устройство ФУ, временной селектор

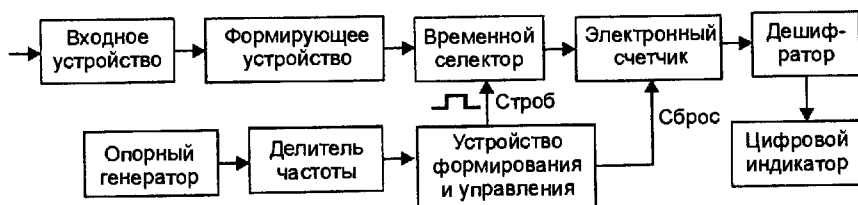


Рис. 9.1. Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты

ВС, опорный генератор ОГ, делитель частоты ДЧ, устройство формирования и управления УФУ, электронный счетчик ЭС, дешифратор ДШ и цифровой индикатор ЦИ.

Входное устройство обеспечивает усиление или, наоборот, ослабление входного сигнала и его фильтрацию.

Формирующее устройство преобразует исследуемый сигнал в последовательность импульсов, частота следования которых равна частоте исследуемого сигнала.

Временной селектор представляет собой логическую схему, которая обеспечивает пропускание на электронный счетчик сформированные импульсы измеряемой частоты только при наличии на управляющем входе стробирующего импульса, длительность которого определяет время измерения.

Опорный генератор является источником сигнала калиброванного временного интервала. В этих целях, как правило, используется высокостабильный термостатированный кварцевый генератор частотой 1 или 5 МГц. С помощью формирующего устройства опорного генератора вырабатывается последовательность импульсов, поступающих на делитель частоты. Делитель частоты формирует последовательность импульсов, частота следования которых в 10^n ($n = 1, 2, 3 \dots$) раз ниже частоты сигнала опорного генератора.

Устройство формирования и управления на основе сигнала, поступающего с делителя частоты, обеспечивает получение прямоугольного строб-импульса, длительность которого определяет время счета и соответственно время измерения.

Электронный счетчик обеспечивает подсчет и запоминание числа импульсов, прошедших через селектор за время строб-импульса.

Информация с электронного счетчика через дешифратор поступает на цифровой индикатор, на табло которого появляется информация в единицах частоты. Перед началом нового цикла измерений необходимо подготовить счетчик, сбросив показания прошлого цикла. Это делается через цепь сброса от устройства управления.

Таким образом, как следует из описания структурной схемы прибора, при измерении частоты на первый вход ВС поступает последовательность импульсов с периодом T_x , определяемым частотой исследуемого сигнала f_x , причем $T_x = 1/f_x$. На второй вход ВС поступает

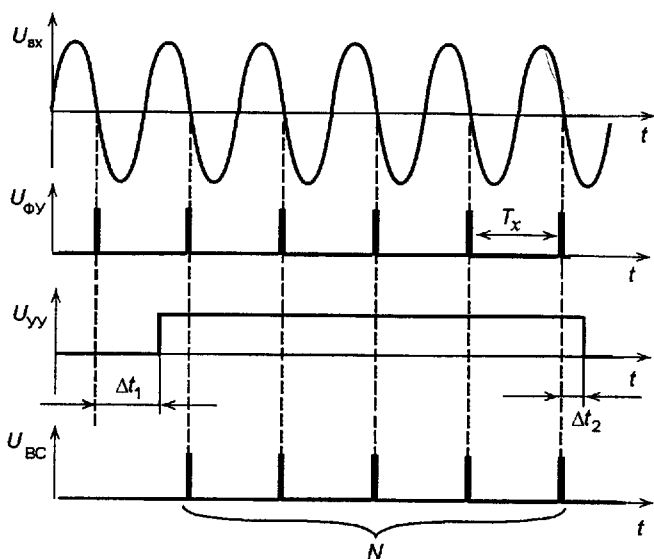


Рис. 9.2. Временные диаграммы работы ЭСЧ в режиме измерения частоты

строб-импульс длительностью

$$\Delta T = 10^n T_{\text{кв}}, \quad (9.1)$$

где $T_{\text{кв}}$ — период следования импульсов с опорного генератора.

На электронный счетчик проходит группа импульсов, число которых

$$N = f_x \Delta T = \frac{\Delta T}{T_x}. \quad (9.2)$$

Если не учитывать погрешность дискретизации и сравнивать значения для ΔT из равенств (9.1) и (9.2), то имеем

$$\frac{10^n}{f_{\text{кв}}} = \frac{N}{f_x},$$

откуда

$$f_x = f_{\text{кв}} \cdot 10^{-n} N. \quad (9.3)$$

Таким образом, измеряемая частота равна числу импульсов N , образованных из измеряемого сигнала, а $f_{\text{кв}} \cdot 10^{-n}$ — коэффициент, определяющий единицу измерения частоты и число значащих цифр при отсчете (рис. 9.2).

Принято выделять две основные составляющие погрешности измерения частоты δ_f . Первая составляющая — это погрешность формирования образцового интервала времени ΔT , в течение которого временной селектор пропускает импульсы, т.е. проводится измерение. Эта

погрешность в основном определяется погрешностью меры, т.е. нестабильностью частоты кварцевого генератора $\delta_{\text{кв}}$ относительно номинального значения устанавливаемого по эталону ($10^{-9} \dots 10^{-10}$), а также кратковременной и долговременной его нестабильностью в течение межповоротного интервала ($10^{-5} \dots 10^{-6}$). За счет термостатирования элементов схемы относительная нестабильность кварцевого генератора в реальных схемах обычно составляет $\delta_{\text{кв}} = 10^{-7} \dots 10^{-9}$.

Погрешность $\delta_{\text{кв}}$ представляет собой достаточно малую величину по сравнению со второй составляющей — погрешностью, определяемой взаимным расположением интервального и счетных импульсов, т.е. погрешностью дискретизации $\delta_{\text{д}}$.

Погрешность дискретного счета $\delta_{\text{д}}$ возникает в данном случае за счет потери части периода измеряемых импульсов Δt_1 , Δt_2 и с некоторой вероятностью может составлять $\Delta N = \pm 1$ импульс.

Относительная погрешность дискретизации

$$\delta_{\text{д}} = \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N} = \pm \frac{1}{f_x \Delta T} = \pm \frac{T_x}{\Delta T}. \quad (9.4)$$

Таким образом, общее выражение для определения относительной нестабильности запишется в следующем виде:

$$\delta_f = \sqrt{\delta_{\text{кв}}^2 + \left(\frac{T_x}{\Delta T} \right)^2}. \quad (9.5)$$

Как видно из приведенных формул, погрешность дискретизации увеличивается с уменьшением измеряемой частоты. В некоторых пределах это увеличение можно компенсировать увеличением времени измерения ΔT . Однако при этом уменьшается быстродействие ЭСЧ. В реальных приборах максимальное время измерения ограничивается значением $\Delta T = 10^4$ мс = 10 с, поэтому при измерении достаточно низких частот применение рассматриваемого метода прямого счета неэффективно. В этом случае измерять частоту следует косвенным методом, измеряя длительность одного или нескольких периодов исследуемого сигнала.

9.2.2. Цифровой измеритель периода

Структурная схема цифрового измерителя в режиме измерения периода представлена на рис. 9.3. Схема содержит те же функциональные элементы, что и цифровой частотомер.

Принцип действия цифрового измерителя поясняется временными диаграммами, представленными на рис. 9.4. В данном случае исследуемый сигнал, период которого измеряется, через входное устройство поступает на формирующее устройство. В формирующем устройстве и устройстве формирования и управления вырабатывается стробирующий импульс с крутыми фронтами, длительность которого определяет время открытого состояния временного селектора. Если не учитывать

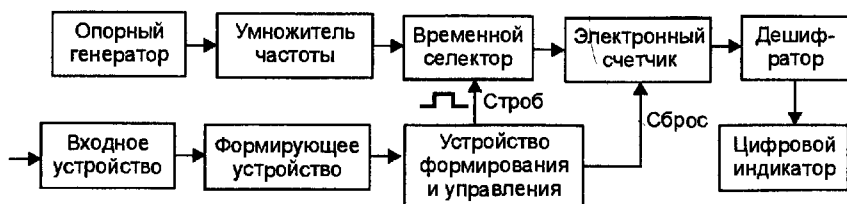


Рис. 9.3. Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения периода

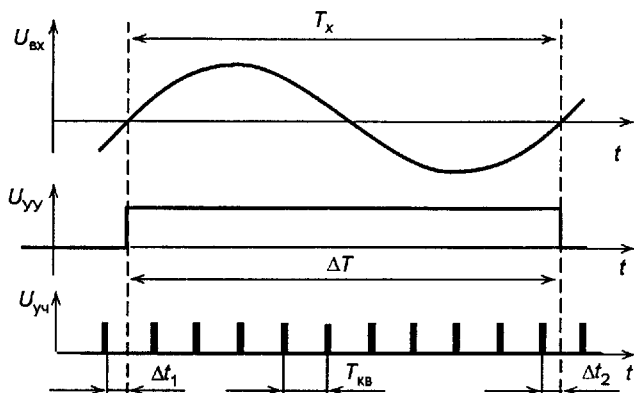


Рис. 9.4. Временные диаграммы работы ЭСЧ в режиме измерения периода

погрешность порогового устройства при формировании прямоугольного импульса, то можно считать, что длительность стробирующего импульса ΔT равна периоду исследуемого сигнала T_x .

На второй вход временного селектора поступают импульсы, период которых $T_{кв}$ задается опорным генератором. Умножитель частоты УЧ увеличивает частоту следования этих импульсов в 10^m раз ($m = 1, 2, 3 \dots$). Число импульсов, считываемых с временного селектора без учета погрешности дискретизации,

$$N = \Delta T / (T_{кв} \cdot 10^{-m}). \quad (9.6)$$

Следовательно, период (длительность) измеряемого временного интервала без учета погрешности определяется числом импульсов, прошедших через временной селектор:

$$T_x = \Delta T = T_{кв} \cdot 10^{-m} N. \quad (9.7)$$

Здесь, как и в цифровых частотомерах, $T_{кв} \cdot 10^{-m}$ определяет единицу измерения и число значащих цифр при отсчете.

Погрешность ЦИВИ, работающего в режиме измерения периода сигнала T_x , определяется тремя составляющими.

Первая составляющая погрешности — это нестабильность частоты опорного генератора $\delta_{кв}$. Так же, как и в цифровых частотомерах, для

снижения этой составляющей погрешности, в качестве опорных используют термостатированные кварцевые генераторы.

Вторая составляющая погрешности — это методическая погрешность. Она определяется некрatностью интервалов T_x и ΔT и называется погрешностью округления (дискретности) — δ_d .

Из временных диаграмм (см. рис. 9.4) следует, что период измеряемого сигнала с учетом общей погрешности дискретизации (дискретности) Δt_d определяется равенством

$$T_x = NT_{\text{кв}} \cdot 10^{-m} - \Delta t_d, \quad (9.8)$$

где $\Delta t_d = \Delta t_1 - \Delta t_2$. При этом максимальная абсолютная погрешность дискретизации определяется изменением числа счетных импульсов на ± 1 , а максимальная относительная погрешность дискретизации

$$\delta_{d\text{max}} = \pm \frac{1}{N} = \pm \frac{1}{T_x f_{\text{кв}}}.$$

Рассматриваемая методическая погрешность носит случайный характер. При распределении этой погрешности по равномерному закону, среднее квадратическое значение погрешности за один период

$$\delta_{d1T} = \pm \frac{1}{2\sqrt{3}T_x f_{\text{кв}}}.$$

При измерении n периодов погрешность δ_{d1T} уменьшится в n раз и при измерении больших интервалов становится сравнимой с $\delta_{\text{кв}}$.

Третья составляющая погрешности цифрового измерителя возникает при формировании из входного сигнала импульса, определяющего измеряемый период ΔT . Это обычно происходит за счет нестабильности порогового устройства, формирующего стробирующий импульс, а также из-за флуктуационных шумов и других помех, присутствующих в измеряемом сигнале. Все это вызывает случайные изменения длительности формируемого импульса и соответственно погрешность измерения δ_3 , называемую погрешностью уровня запуска.

Таким образом, результирующая погрешность цифрового измерителя периода

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_{\text{кв}}^2 + \delta_d^2 + \delta_3^2}. \quad (9.9)$$

Электронно-счетные частотомеры, кроме рассмотренных режимов работы, обычно работают в режиме измерения отношения частот и режиме измерения интервалов времени. В этих режимах исследуемые сигналы подаются на два отдельных входа «В» и «Г».

Так, в режиме измерения интервалов времени (длительности импульсов, временных сдвигов между импульсами и др.) на каждом входе ЭСЧ включаются пороговые устройства, срабатывающие под воздействием входных импульсов и управляющие работой формирователя

временных интервалов. На выходе формирователя вырабатывается импульсный сигнал. Длительность этого импульса равна временному интервалу между соответствующими фронтами входных импульсов с положительными или отрицательными переходами.

Суммарная погрешность измерения временного интервала, кроме погрешности кварцевого генератора $\delta_{кв}$ и погрешности дискретизации $\delta_{д}$, имеет составляющую погрешности из-за неопределенности уровня срабатывания пороговых устройств $\delta_{пор}$.

Заметим, что во всех рассмотренных режимах имеет место погрешность дискретизации, имеющая случайный характер. Величину этой погрешности можно уменьшить путем многократных измерений, однако, при этом увеличивается время измерений. Вместе с тем при измерении временного интервала, например, длительности фронта импульса, погрешность дискретизации можно уменьшить на основе использования нониусного метода.

9.2.3. Измерение временных интервалов нониусным методом

Нониусный метод измерения временных интервалов позволяет снизить погрешность дискретизации, которая имеет место при использовании метода дискретного счета для измерения коротких временных интервалов, например фронтов импульсов.

Рассмотрим работу нониусного измерителя временных интервалов [14] (рис. 9.5).

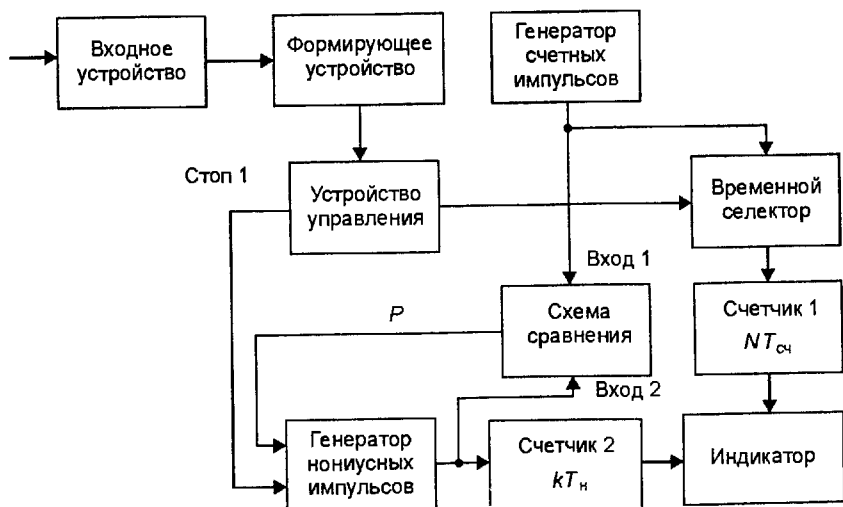


Рис. 9.5. Структурная схема измерителя временных интервалов нониусным методом

Входной исследуемый сигнал длительности T_x поступает на формирующее устройство, где вырабатываются два импульса: «стартовый», соответствующий началу интервала T_x , и «стоповый», соответствующий концу этого интервала. Стартовый импульс через устройство управления открывает временной селектор, обеспечивая тем самым прохождение через него счетных импульсов с периодом повторения $T_{сч}$ от генератора счетных импульсов на первый счетчик.

Счетные импульсы поступают также на первый вход схемы сравнения. Стоповый импульс через устройство управления закрывает временной селектор, и отсчет в первом счетчике прекращается. Если при этом в нем оказалось зафиксировано N счетных импульсов, то измеренный временной интервал

$$T_x = NT_{сч} + \Delta t, \quad (9.10)$$

где Δt — погрешность дискретизации.

Кроме генератора счетных импульсов, в схеме имеется генератор нониусных импульсов. Параметры указанных генераторов выбираются из следующих условий:

$$T_H < T_{сч}, \quad (9.11)$$

$$T_H = T_{сч} \frac{n-1}{n}, \quad (9.12)$$

$$T_{сч} - T_H = \frac{T_{сч}}{n}, \quad (9.13)$$

где n — целое число, обычно кратное 10.

Разность (9.13) обычно называют шагом нониуса.

Генератор нониусных импульсов запускается через устройство управления стоповым импульсом. Нониусные импульсы начинают поступать с выхода генератора нониусных импульсов на второй вход схемы сравнения и на второй счетчик. Временное расстояние между счетными и нониусными импульсами с каждым периодом уменьшается, и в момент их совпадения схема сравнения вырабатывает импульсы сброса, который останавливает работу ГНИ. Если во втором счетчике при этом зафиксировано k нониусных импульсов, то интервал Δt определяется из соотношения

$$\Delta t = kT_{сч} - kT_H. \quad (9.14)$$

С учетом (9.13) получаем

$$\Delta t = \frac{k}{n} T_{сч}. \quad (9.15)$$

Следовательно,

$$T_x = NT_{сч} + \frac{k}{n} T_{сч}. \quad (9.16)$$

В полученном выражении измеряемый интервал определяется целым числом шагов счетных импульсов и числом шагов нониуса.

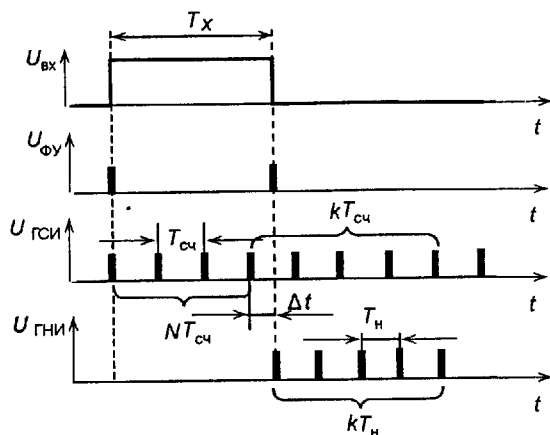


Рис. 9.6. Диаграммы измерения временных интервалов нониусным методом

В современных нониусных измерителях погрешность измерений имеет порядок 10^{-9} . Эта погрешность определяется следующими составляющими: длительностью и формой счетных и нониусных импульсов; нестабильностью генераторов; неполным совпадением (частичным перекрытием) импульсов в схеме совпадений (рис. 9.6).

9.3. Метод сравнения

Сущность данного метода заключается в сравнении частоты исследуемого сигнала с частотой известного источника. В качестве известного источника часто используют перестраиваемый генератор (гетеродин), поэтому метод сравнения называют также гетеродинным методом.

Для реализации рассматриваемого метода необходимо иметь генератор сигнала образцовой частоты и индикатор, с помощью которого можно определить равенство или кратность частот сравниваемых сигналов. Исследуемый и образцовый сигналы подают на устройство сравнения, а результирующий сигнал — с его выхода на индикатор.

Схема, реализующая метод сравнения на основе гетеродинного преобразователя, представлена на рис. 9.7.

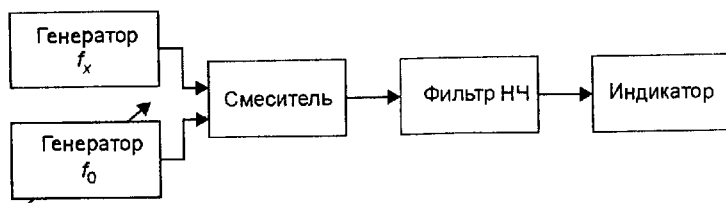


Рис. 9.7. Структурная схема реализации метода сравнения

Два высокочастотных гармонических сигнала частотой f_0 и f_x подаются на устройство сравнения — нелинейный смеситель. На выходе смесителя образуется сложный по форме сигнал, в составе которого, помимо колебаний с частотами f_0 и f_x , имеются их гармоники nf_0 и mf_x , а также комбинационные составляющие $\pm nf_0$ и $\pm mf_x$. Из всех этих частот путем фильтрации выделяются разностные частоты $nf_0 - mf_x$. В зависимости от вида применяемого оконечного измерителя (индикатора) возможны различные способы сравнения.

Одним из распространенных является способ нулевых биений. Суть его состоит в том, что с выхода смесителя с помощью фильтра низких частот выделяется сигнал с самой низкой частотой F , равной разности сравниваемых частот, т.е. $F = |f_0 - f_x|$.

Частота F называется частотой биений. Если частоты f_0 и f_x равны друг другу, то частота биений равна нулю, поэтому способ измерения с помощью биений называют также способом нулевых биений.

На практике в качестве индикатора частоты биений часто используют головной телефон. Если плавно изменять образцовую частоту f_0 , то, начиная со значения разностной частоты $F = 15 \dots 20$ кГц, в телефоне будет слышен тон, понижающийся по мере приближения частоты f_0 к измеряемой частоте f_x . Однако определить момент, когда $f_0 = f_x$ по отсутствию тона в телефоне нельзя, поскольку человеческое ухо не реагирует на частоты ниже 20 Гц. Таким образом, при использовании в качестве индикатора головных телефонов несовершенство органов слуха человека приводит к абсолютной погрешности определения частоты f_x до ± 20 Гц.

Некоторого уменьшения погрешности измерения при использовании рассматриваемого способа можно достичь, используя вилочный отсчет. При вилочном отсчете устанавливают некоторую частоту f_1 , при которой слышен удобный для запоминания тон биений (точка 1 на рис. 9.8).

Затем, перейдя зону нулевых биений, устанавливают образцовую частоту на значение f_2 , при которой появляется прежний тон биений (точка 2 на рис. 9.8). Значение искомой частоты f_x определяется как среднее арифметическое двух значений образцовой частоты:

$$f_x = (f_1 + f_2)/2. \quad (9.17)$$

Повышения точности установления равенства сравниваемых частот можно достичь, заменив телефон миллиамперметром магнитоэлектрической системы, т.е., заменив слуховой индикатор визуальным, колебания стрелки прибора магнитоэлектрической системы становятся заметными при частоте менее 10 Гц, а при $f_x = f_0$ стрелка останавливается на нуле.

Заметим, что в наиболее общем случае разностная частота $F = nf_0 - mf_x$. Тогда после получения нулевых биений по шкале гетеродина определяется частота f_0 , а затем находится

$$f_x = \frac{n}{m} f_0. \quad (9.18)$$

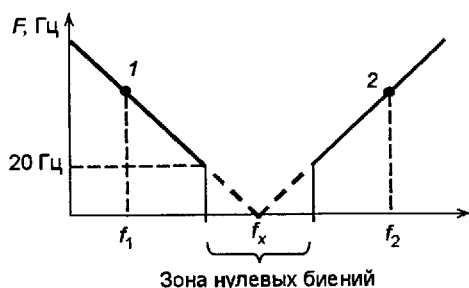


Рис. 9.8. График соотношения частот при способе нулевых биений

Очевидно, что в данном случае нулевые биения могут быть получены при различных соотношениях n и m . Возникающая при этом неопределенность может быть устранена, например, путем предварительного ориентировочного измерения частоты f_x каким-либо другим методом.

Преднамеренное использование гармоник f_0 и f_x позволяет существенно расширить диапазон измерения.

Погрешность измерения частоты методом сравнения складывается из погрешности образцовой частоты (гетеродина) и погрешности сравнения.

Для уменьшения погрешности в ряде случаев в качестве генератора образцовой частоты f_0 применяют синтезаторы частоты, а при инженерно-технических измерениях для этого обычно используют измерительные генераторы.

В инженерной практике метод сравнения часто реализуется с использованием в качестве индикатора электронного осциллографа. Измерение частоты в данном случае возможно как при линейной, так и при синусоидальной развертке осциллографа (см. разд. 8.4.3).

9.4. Резонансный метод

Обобщенная структурная схема измерения частоты резонансным методом представлена на рис. 9.9. Метод основан на явлении электрического резонанса и используется, как правило, на высоких, ультравысоких и сверхвысоких частотах.

Основными элементами структурной схемы являются колебательная система, элементы связи с источником электромагнитных колебаний и индикатором, органы настройки колебательной системы и индикатор. Конструкция колебательной системы зависит от диапазона измеряемых частот. На частотах от 50 кГц до 200 МГц используют контуры с сосредоточенными постоянными.

Упрощенная схема резонансного частотомера с сосредоточенными постоянными показана на рис. 9.10.

Исследуемое напряжение через катушку связи подводится к колебательному контуру, состоящему из прецизионного конденсатора C_0 и

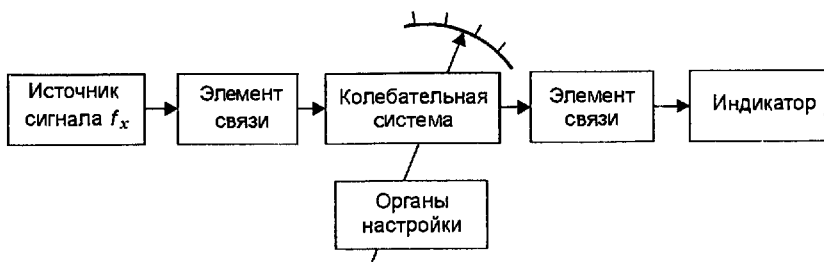


Рис. 9.9. Обобщенная структурная схема измерителя частоты резонансным методом

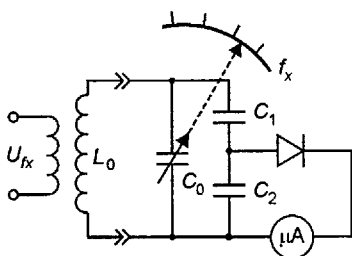


Рис. 9.10. Упрощенная схема резонансного частотомера на элементах с сосредоточенными постоянными

сменной катушки L_0 . Колебательный контур настраивается в резонанс с частотой исследуемого напряжения. В момент наступления резонанса измеряемая частота

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_0 C_0}. \quad (9.19)$$

Момент настройки контура в резонанс определяется по максимуму показаний индикатора. Значение частоты отсчитывается непосредственно по шкале верньерного механизма поворота ротора конденсатора. Использование сменных катушек

индуктивности позволяет обеспечить перекрытие широкого диапазона частот. В качестве индикатора обычно применяется детекторный измерительный прибор.

При измерении на сверхвысоких частотах в резонансных частотомерах применяют колебательные системы с распределенными постоянными. В зависимости от диапазона измеряемых частот колебательный контур выполняется либо в виде отрезка коаксиальной линии, либо в виде объемного резонатора. Коаксиальная линия настраивается в резонанс изменением длины ее внутреннего проводника, объемный резонатор — изменением его объема. Механизмы настройки градуируют в безразмерных делениях с большим числом отсчетных точек; для определения измеряемой частоты прилагают градуировочные таблицы. Некоторые частотомеры градуируют непосредственно в единицах частоты.

В настоящее время используют различные схемы резонансных частотомеров с распределенными постоянными: полуволновый резонансный частотомер; четвертьволновый резонансный частотомер; резонансный частотомер с нагруженной линией; резонансный частотомер с объемным резонатором и др. [14, 26].

Полуволновый резонансный частотомер имеет колебательную систему, выполненную в виде закороченного отрезка коаксиальной линии, длина которого регулируется перемещением поршня П (рис. 9.11).

Резонанс наступает каждый раз, когда длина линии равна примерно половине длины волны измеряемого колебания $l \approx n\lambda/2$.

Если микрометрический механизм перемещения поршня градуирован в единицах длины l , то, настраивая частотомер последовательно дважды на максимум показаний индикатора, можно определить длину волны $\lambda = 2(l_2 - l_1)$, где l_2 и l_1 — отсчеты положения поршня в единицах длины при резонансах.

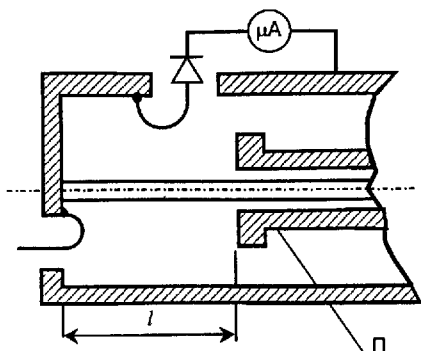


Рис. 9.11. Полуволновый резонансный частотомер

Четвертьволновый резонансный частотомер имеет колебательную систему, выполненную в виде разомкнутого отрезка коаксиальной линии (рис. 9.12).

Настройка контура осуществляется изменением длины l внутреннего проводника коаксиальной линии, резонанс наступает при длине l , равной нечетному числу четвертей длин волн измеряемого колебания:

$$l \approx (2n + 1)\lambda/4, \quad (9.20)$$

где n — целое число.

Измерением длины внутреннего проводника при двух соседних резонансах можно найти значение половины длины волны:

$$l_2 - l_1 = \lambda/2. \quad (9.21)$$

Резонансный частотомер с нагруженной линией имеет разомкнутую коаксиальную линию, нагруженную на емкость, образуемую торцами внутреннего и наружного проводников (рис. 9.13).

При настройке такой колебательной системы одновременно изменяются и длина линии l , и емкость C . Это позволяет расширить перекрытие диапазона частот по сравнению с рассмотренными частотомерами более чем в два раза (от 1,3...1,5 до 3...4).

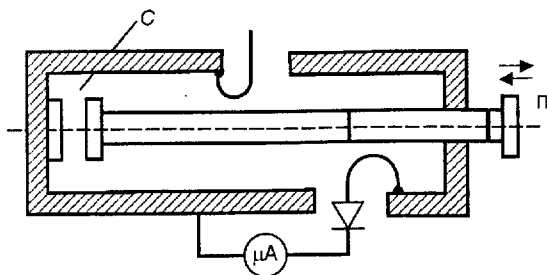


Рис. 9.12. Четвертьволновый резонансный частотомер

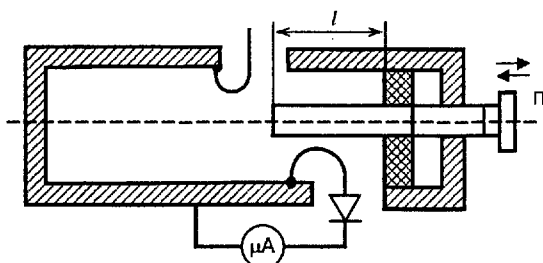


Рис. 9.13. Резонансный частотомер с нагруженной линией

Резонансные частотомеры с объемными резонаторами имеют резонансную систему в виде замкнутой полости, ограниченной металлическими стенками. В полости образуются стоячие волны электромагнитного поля, длина которых определяется типом возбужденной волны и геометрическими размерами полости. Для настройки объемного резонатора его объем изменяется перемещением поршня (рис. 9.14) либо введением в полость металлического стержня (рис. 9.15).

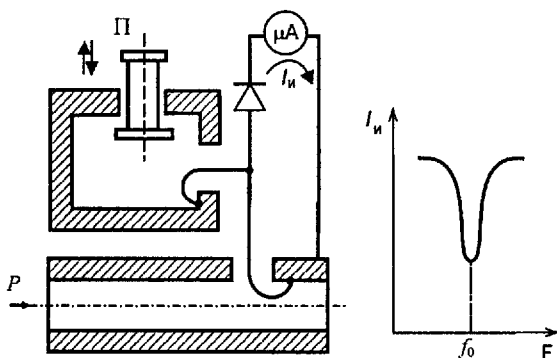


Рис. 9.14. Резонансный частотомер с индикацией по минимуму

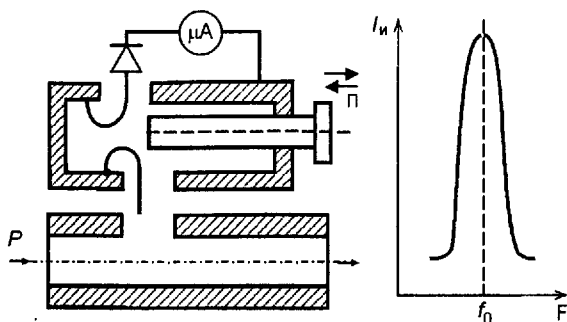


Рис. 9.15. Резонансный частотомер с индикацией по максимуму

Объемный резонатор предварительно градуируют при помощи измерительного генератора соответствующего диапазона частот.

В зависимости от способа введения в полость резонатора возбуждающего электромагнитного поля в нем возникают колебания различных типов. Так, при возбуждении резонатора через отверстие, расположенное в центре торцевой стенки, возникают колебания типа H_{111} , а при возбуждении через отверстие в боковой стенке цилиндра (см. рис. 9.14, 9.15) — колебания типа H_{011} .

При включении резонансных частотомеров в СВЧ-тракт возможны два вида схем включения: проходная с индикацией настройки по максимуму (см. рис. 9.15) и поглощающая (оконечная, реактивная) с индикацией настройки по минимуму (см. рис. 9.14).

Для реализации проходной схемы резонатор должен иметь обязательно два элемента связи: входной для связи с СВЧ-трактом и выходной для связи с индикатором. Момент настройки в резонанс определяется в данном случае по максимальному показанию индикатора. Проходная схема используется, как правило, для измерения частоты генераторов большой мощности.

Частотомер с поглощающей схемой включения имеет только один элемент связи — входной, а индикатор, как и частотомер, включен в линию передачи СВЧ сигнала. Пока контур частотомера не настроен в резонанс с частотой исследуемого сигнала, показания индикатора максимальны, а при настройке часть энергии поля поглощается и показания индикатора уменьшаются. Такую схему обычно используют при измерении частоты маломощных источников СВЧ.

Источниками погрешности измерения частоты резонансным методом являются неточность фиксации резонанса, погрешности из-за влияний условий измерения (температура, влажность и др.), погрешности механизма настройки и др. Резонансные частотомеры обеспечивают погрешность измерения 0,01...0,5 %.

9.5. Метод перезаряда конденсатора

Данный метод основан на измерении прибором среднего тока I_{cp} разряда (заряда) конденсатора C при его периодическом заряде (разряде) с частотой измеряемого сигнала f_x .

Схема, поясняющая принцип измерения частоты методом перезаряда конденсатора, представлена на рис. 9.16. Здесь коммутатор K позволяет периодически заряжать и разряжать конденсатор C в такт с частотой f_x исследуемого напряжения U_{fx} .

При присоединении конденсатора C к источнику напряжения конденсатор заряжается и в нем накапливается количество электричества

$$q = CU. \quad (9.22)$$

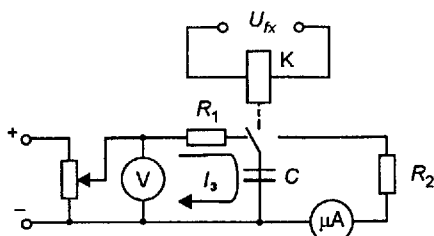


Рис. 9.16. Схема измерения частоты методом перезаряда конденсатора

При переключении конденсатора на измеритель тока происходит разряд конденсатора через резистор R_2 и измеритель тока. Если постоянная времени цепи заряда $\tau_3 = R_1 C$ и постоянная времени цепи разряда $\tau_p = R_2 C$ меньше половины периода исследуемого колебания, т.е. если в течение периода исследуемого колебания происходят заряд и разряд конденсатора, тогда среднее

значение тока разряда конденсатора, протекающего через микроамперметр, можно определить по формуле

$$I_{cp} = f_x q = f_x C U. \quad (9.23)$$

Отсюда следует, что ток в такой схеме прямо пропорционален частоте переключения, и при постоянном произведении CU шкалу прибора можно градуировать в единицах частоты:

$$f = I_{cp} / (CU). \quad (9.24)$$

Метод перезаряда конденсатора используют в диапазоне от 20 Гц до 500 кГц. Верхний предел диапазона частот ограничивается величинами постоянных времени заряда τ_3 и времени разряда τ_p , временем переключения конденсатора и чувствительностью измерительного прибора.

На практике метод перезаряда конденсатора используют в измерителях частоты, входящих в измерительный комплект ИК-2, предназначенный для измерения параметров маломощных УКВ-радиостанций. В этих приборах получили распространение коммутирующие устройства на полупроводниковых приборах.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите методы измерения частоты.
2. Поясните принцип действия цифрового частотомера по структурной схеме.
3. Поясните принцип действия цифрового измерителя временных интервалов по структурной схеме.
4. Почему цифровой частотомер не рекомендуется использовать при измерении низкой частоты?
5. Поясните принцип измерения частоты методом сравнения.
6. Почему при измерении частоты резонансным методом на разных частотах используются различные колебательные системы?
7. Поясните принцип измерения частоты методом перезаряда конденсатора.

Измерение параметров элементов электрических цепей с сосредоточенными постоянными

10.1. Общие сведения о параметрах элементов радиотехнических устройств

В практике эксплуатации телекоммуникационных систем часто возникает необходимость оценки параметров элементов электрических цепей различных радиотехнических устройств. Наиболее распространенными пассивными линейными элементами радиоэлектронных устройств, параметры которых приходится измерять, являются резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, колебательные контуры, полупроводниковые приборы. Указанные элементы характеризуются своими основными и сопутствующими (паразитными) параметрами.

Для резистора основным параметром будем считать сопротивление электрическому току R , а сопутствующими — индуктивность L_R и емкость C_R . Наибольший интерес в практике электрорадиотехнических измерений для резистора представляет его активное сопротивление.

Основным параметром конденсатора является электрическая емкость C , а сопутствующими — индуктивность пластин и выводов L_C и сопротивление потерь в диэлектрике R_C . Эквивалентная схема конденсатора в общем случае состоит из трех элементов (рис. 10.1, а).

В рабочем диапазоне частот, когда $f < f_p = 1/2\pi\sqrt{L_C C}$ для большинства конструкций конденсаторов L_C пренебрежимо мала и эквивалентная схема конденсатора при измерениях может быть представлена состоящей из двух элементов (табл. 10.1).

Потери, имеющие место в конденсаторе, учитывают с помощью активного сопротивления, которое по отношению к конденсатору включается последовательно (r) или параллельно (R). Показателем потерь в конденсаторе является тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_c$ или

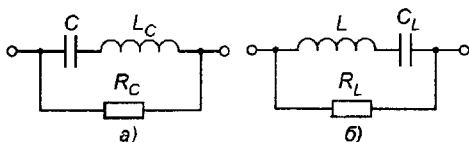
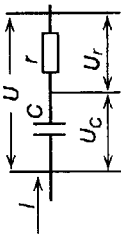
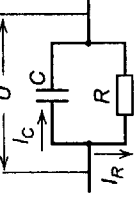
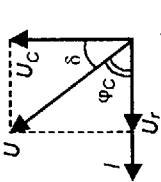
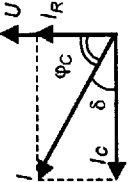
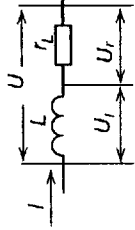
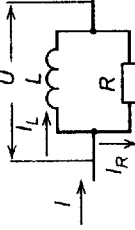
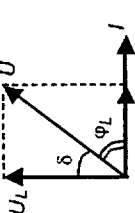
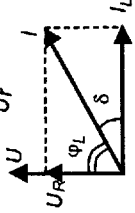


Рис. 10.1. Эквивалентные схемы конденсатора (а) и катушки индуктивности (б)

Таблица 10.1

Схемы замещения и векторные диаграммы элементов электрических цепей

Элемент электрической цепи		Формулы $\operatorname{tg} \delta$ и Q	
Условное обозначение и реактивное сопротивление	Эквивалентная схема замещения	Векторные диаграммы токов и напряжений	
$\text{---} \parallel \text{---}$ $x_C = \frac{1}{j\omega C}$	 	 	$\operatorname{tg} \delta_C = \frac{U_r}{U_C} = \frac{I_r}{I/(\omega C)} = r\omega C; Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_C} = \frac{1}{r\omega C}$ $\operatorname{tg} \delta_C = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/(\omega C)}{R} = \frac{1}{\omega CR}; Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_C} = \omega CR$
$\text{---} \text{---}$ $x_L = j\omega L$	 	 	$\operatorname{tg} \delta_L = \frac{U_r}{U_L} = \frac{I_r}{I\omega L} = \frac{r}{\omega L}; Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_L} = \frac{\omega L}{r}$ $\operatorname{tg} \delta_L = \frac{I_r}{I_L} = \frac{U\omega L}{R} = \frac{\omega L}{R}; Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_L} = \frac{R}{\omega L}$

добротность Q (см. табл. 10.1):

$$\operatorname{tg} \delta_c = \frac{U_r}{U_C} = \frac{1}{R\omega C} = r\omega C; \quad Q = \frac{1}{r\omega C} = \omega CR.$$

Для конденсаторов, потери которых очень малы ($\operatorname{tg} \delta < 0,001$), можно считать $\operatorname{tg} \delta \approx \delta$.

Для катушки индуктивности основным параметром является индуктивность L , сопутствующими — сопротивление потерь R_L и собственная емкость катушки C_L . Эквивалентная схема катушки индуктивности, как и конденсатора, в общем случае состоит из трех элементов (рис. 10.1,б). У большинства катушек индуктивности C_L на рабочих частотах пренебрежимо мала, и эквивалентная схема содержит L и R (r) (см. табл. 10.1). Как и в конденсаторе, показателем потерь в катушке индуктивности является добротность Q или тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_L$.

В соответствии с ГОСТ 15094-84 приборы для измерения параметров компонентов цепей с сосредоточенными постоянными относят к подгруппе, обозначаемой буквой Е, а по виду делят на следующие:

- Е2 — измерители полных сопротивлений;
- Е3 — измерители индуктивности;
- Е4 — измерители добротности;
- Е6 — измерители сопротивлений;
- Е7 — универсальные измерители параметров;
- Е8 — измерители емкостей;
- Е9 — преобразователи параметров.

10.2. Методы измерения параметров элементов, основанные на измерении токов и напряжений

10.2.1. Электромеханический омметр

Активные сопротивления по значению измеряемой величины принято разделять на три группы: малые — до 1,0 Ом, средние — от 1,0 Ом до 1,0 МОм, большие — более 1 МОм. Приборы, измеряющие значения сопротивлений электрическому току, называют омметрами. В практике электрорадиотехнических измерений используют электромеханические, аналоговые электронные и цифровые электронные омметры.

Схемы рассматриваемых электромеханических омметров представлены на рис. 10.2, где E — источник питания, в качестве которого обычно применяют гальванические элементы; Ω — миллиамперметр (амперметр) магнитоэлектрической системы с внутренним сопротивлением $R_{\text{пр}}$, шкала которого проградуирована в единицах сопротивления; R_k — переменный калибровочный резистор; R_x — измеряемое сопротивление.

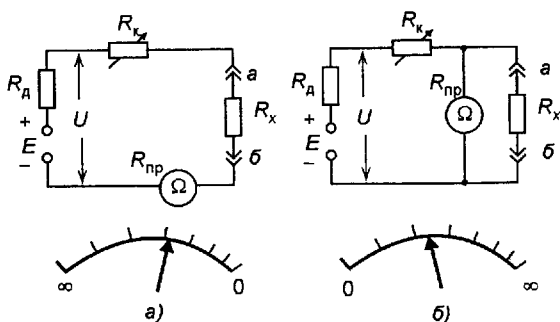


Рис. 10.2. Схемы омметров с последовательным (а) и параллельным (б) соединением

Принцип действия электромеханических омметров основан на зависимости тока, протекающего через прибор, от сопротивления R_x , включенного в схему измерения.

При последовательном соединении R_x и миллиамперметра (рис. 10.2,а) ток, протекающий через прибор, с увеличением R_x уменьшается:

$$I = U / (R_K + R_x).$$

При замкнутых зажимах а, б, т.е. когда $R_x = 0$, ток, протекающий через прибор, максимален и при разомкнутых зажимах а, б, когда $R_x = \infty$, ток равен нулю. Следовательно, у омметров с последовательным соединением R_x и миллиамперметра нулевая отметка находится в правой части шкалы.

До начала измерений такие омметры калибруют путем установки указателя прибора на ноль шкалы потенциометром R_K при замкнутых накоротко зажимах а, б. Необходимость калибровки вызвана тем, что напряжение источника питания U с течением времени уменьшается и градуировка шкалы нарушается.

Последовательные схемы обычно применяют для измерения сравнительно больших сопротивлений (до единиц мегаом). Это объясняется тем, что в данной схеме малые сопротивления слабо влияют на изменение тока в измерительном механизме.

Уравнение шкалы магнитоэлектрического прибора для последовательной схемы

$$\alpha = SI = S \frac{U}{R_K + R_x + R_{нп}}, \quad (10.1)$$

где S — чувствительность магнитоэлектрического измерительного механизма; α — угол отклонения стрелки измерительного механизма.

При параллельном соединении R_x и миллиамперметра (рис. 10.2,б) ток, протекающий через прибор, с увеличением измеряемого сопротивления R_x растет и шкала градуируется от 0 до ∞ . Омметр с параллель-

ным включением калибруется при разомкнутых зажимах а, б, стрелка прибора при этом устанавливается потенциометром R_k на отметку ∞ .

Параллельную схему обычно используют для измерения сравнительно малых сопротивлений (до сотен Ом), так как большие сопротивления здесь слабо влияют на изменение тока, проходящего через прибор.

Уравнение шкалы прибора параллельной схемы (см. рис. 10.2,б)

$$\alpha = SI = SU \frac{R_x + R_{\text{пр}}}{R_x R_{\text{пр}} + R_k (R_x + R_{\text{пр}})} \quad (10.2)$$

Из приведенных уравнений следует, что при постоянных значениях U , $R_{\text{пр}}$, R_k и S угол поворота измерительного механизма α определяется значением измеряемого сопротивления R_x . В обоих случаях шкала омметра неравномерна.

Еще один недостаток рассмотренных схем омметров — необходимость калибровки перед измерением. Этого недостатка нет у омметров с логометрическим (двухрамочным) измерительным механизмом.

Напомним, что в логометрах противодействующий момент создается электрическим путем за счет того, что подвижная часть состоит из двух жестко скрепленных между собой рамок 1 и 2, имеющих внутренние сопротивления R_1 и R_2 (рис. 10.3). По обмоткам рамок и добавочным резисторам $R_{\text{д1}}$ и $R_{\text{д2}}$ протекают токи I_1 и I_2 . Так как уравнение шкалы логометра определяется отношением токов в обмотках, а $I_1 = U/(R_1 + R_{\text{д1}})$, $I_2 = U/(R_2 + R_{\text{д2}} + R_x)$, то угол

$$\alpha = \varphi \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = \varphi \left(\frac{R_2 + R_{\text{д2}} + R_x}{R_1 + R_{\text{д1}}} \right), \quad (10.3)$$

т.е. угол отклонения определяется значением R_x и не зависит от напряжения U .

10.2.2. Измерение активного сопротивления методом вольтметра и амперметра

Метод вольтметра-амперметра является косвенным, так как сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым сопротивлением и последующим расчетом его по закону Ома.

Суть метода поясняется схемами на рис. 10.4. Достоинство его состоит в том, что резистор, сопротивление которого измеряется, можно поставить в реальные условия работы, т.е. пропускать через него реально действующий ток, что важно при измерении сопротивлений, значения которых зависят от тока. Например, этим способом можно измерять

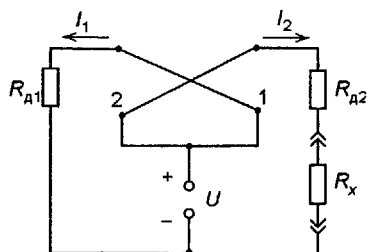


Рис. 10.3. Схема омметра с логометрическим измерительным механизмом

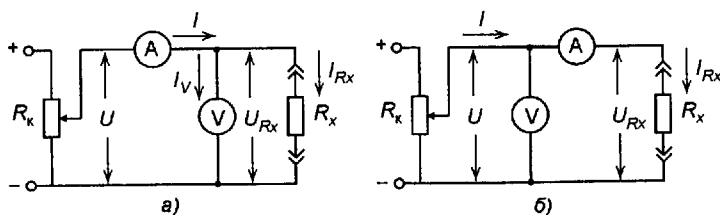


Рис. 10.4. Схема измерения активного сопротивления методом вольтметра (а) и амперметра (б)

вольт-амперные характеристики нелинейных двухполюсников, таких как варисторы, терморезисторы и другие.

Действительное значение измеряемого сопротивления

$$R_x = U_{R_x} / I_{R_x}.$$

Реальное значение R_x , измеренное по схемам на рис. 10.4, а и б, будет отличаться от действительного R_x из-за конечных значений внутренних сопротивлений приборов R_V и R_A , т.е. будет иметь место методическая погрешность.

Для схемы на рис. 10.4, а справедливо равенство

$$R'_x = \frac{U_{R_x}}{I - I_V} = \frac{U_{R_x}}{I - U_{R_x}/R_V},$$

где I_V — ток, протекающий через вольтметр; R_V — сопротивление вольтметра, т.е. часть тока будет протекать, минуя R_x , через R_V , чем физически и объясняется методическая погрешность измерения.

Абсолютная методическая погрешность

$$\Delta R_x = R'_x - R_x = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} - R_x = -\frac{R_x^2}{R_x + R_V}. \quad (10.4)$$

Относительная погрешность

$$\delta = -\frac{R_x}{R_x + R_V} \cdot 100 \%. \quad (10.5)$$

Из выражения (10.5) для δ следует, что данной схемой (рис. 10.4, а) следует пользоваться в тех случаях, когда R_V велико по сравнению с R_x , т.е. при измерении малых сопротивлений.

Для схемы на рис. 10.4, б справедливо равенство

$$\Delta R_x = R'_x - R_x = R_A + R_x - R_x = R_A, \quad (10.6)$$

где R_A — сопротивление амперметра;

$$\delta = \frac{R_A}{R_x} \cdot 100 \%. \quad (10.7)$$

В данном случае относительная методическая погрешность обратно

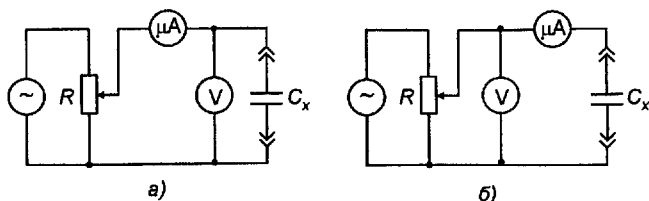


Рис. 10.5. Схема измерения емкости методом вольтметра и амперметра

пропорциональна R_x , следовательно, эту схему целесообразно использовать, когда $R_A < R_x$, т.е. при больших значениях R_x .

10.2.3. Измерение емкости методом вольтметра и амперметра

Схемы измерений, поясняющие сущность метода, представлены на рис. 10.5.

Суть метода состоит в том, что по показаниям приборов, измеряющих переменный ток (μA) и напряжение (V), можно рассчитать точное сопротивление конденсатора C_x , включенного в схему измерения:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = U/I, \quad (10.8)$$

где $X = 1/\omega C_x = 1/2\pi f C_x$.

Если потери малы, т.е. активная составляющая полного сопротивления значительно меньше его реактивной составляющей $R \ll X_c$, то $1/2\pi f C_x = U/I$,

$$C_x = \frac{I}{U} \frac{1}{2\pi f}. \quad (10.9)$$

Питание измерительной схемы обычно производят от низкочастотного источника.

Схему на рис. 10.5,а применяют для измерения емкостей, сопротивления которых X_c значительно меньше входного сопротивления вольтметра ($X_c \ll R_V$), т.е. для измерения больших емкостей.

Наоборот, схему на рис. 10.5,б применяют для измерения меньших емкостей, сопротивления которых значительно больше сопротивления миллиамперметра ($X_c \gg R_A$). Сопротивление определяют с учетом частоты сигнала из условия (10.9).

10.2.4. Электронный омметр

Принцип работы электронных омметров основан, как правило, на двух методах: методе стабилизированного тока в цепи делителя и методе преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение.

Схема омметра, построенная по методу стабилизированного тока в цепи делителя, представлена на рис. 10.6. В данной схеме делитель,

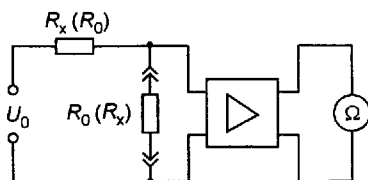


Рис. 10.6. Схема измерения сопротивления методом стабилизированного тока в цепи делителя

составленный из R_0 и R_x , питается от источника опорного напряжения U_0 . Падение напряжения на резисторе R_x усиливается усилителем с большим входным сопротивлением.

Выходное напряжение усилителя зависит от величины измеряемого сопротивления R_x , так как напряжение, действующее на R_x , несет информацию о значении этого сопротивления.

Однако строгой линейной зависимости между R_x и величиной измеряемого напряжения не будет, так как с изменением R_x будет изменяться не только напряжение на нем, но и общий ток, протекающий через делитель R_0 – R_x . Чтобы ток, протекающий через R_x , мало изменялся, нужно обеспечить выполнение условия $R_x \ll R_0$. Однако при малой R_x сказывается влияние сопротивления соединительных проводов, что вызывает потребность непосредственного подключения прибора к измеряемому сопротивлению. Для данной схемы

$$\alpha = K \frac{U_0}{R_x + R_0} R_x, \quad (10.10)$$

где K — коэффициент передачи усилителя.

Из формулы видно, что шкала таких омметров нелинейна с диапазоном показаний от 0 до ∞ . При $R_x \ll R_0$ можно считать

$$\alpha \approx K \frac{U_0}{R_0} R_x. \quad (10.11)$$

Следовательно, шкала прибора будет более линейной. Приборы такого типа обеспечивают измерение малых сопротивлений, когда $R_x < R_0$ (Е6-12, Е6-16, Е6-18).

Для повышения точности измерения весь диапазон измерений разбивается на поддиапазоны, каждому из которых соответствует свое значение R_0 . Переключением R_0 выбирают наиболее удобную шкалу для отсчитывания показаний в требуемом диапазоне измерений.

В схеме, реализующий метод преобразования сопротивления в напряжение, применяется операционный усилитель с отрицательной обратной связью (рис. 10.7). Такие схемы используют для измерения средних и больших сопротивлений.

Измеряемый резистор R_x включается в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя, имеющего большой коэффициент усиления и большое входное сопротивление. Известно, что для таких схем

$$U_x = U_0 \frac{R_x}{R_0} \frac{1}{1 + 1/(K\beta)},$$

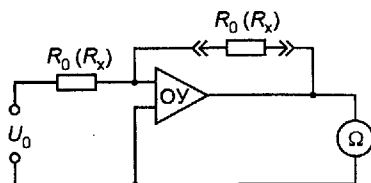


Рис. 10.7. Схема омметра на операционном усилителе

где K — коэффициент усиления без обратной связи; $\beta = R_0/(R_0 + R_x)$ — коэффициент обратной связи.

При большом коэффициенте усиления, т.е. когда $K\beta \geq 1$, можно записать

$$U_x = U_0 \frac{R_x}{R_0}.$$

Уравнение шкалы прибора в данном случае

$$\alpha = KU_0 R_x / R_0. \quad (10.12)$$

В анализируемой схеме омметр имеет равномерную шкалу. Такие омметры используют в основном для измерения сопротивлений до сотен МОм (например, омметр Е6-10).

Заметим, что в схемах на рис. 10.6 и 10.7 R_x и R_0 можно поменять местами.

В этом случае для схемы рис. 10.6 будет справедливо равенство

$$\alpha = K_1 U_0 R_0 / (R_0 + R_x), \quad (10.13)$$

где, как и в первом случае, K_1 — коэффициент преобразования УПТ измерительного прибора.

Шкала прибора неравномерная с диапазоном показаний от ∞ до 0. Эта схема омметра используется для измерения больших сопротивлений, когда $R_x > R_0$.

Для схемы рис. 10.7 после перемены местами R_x и R_0 уравнение шкалы будет следующим:

$$\alpha = KU_0 R_0 / R_x. \quad (10.14)$$

Шкала прибора неравномерная. Такие схемы применяют в основном для измерения больших сопротивлений (например, тераомметры Е6-13, Е6-14).

10.3. Мостовые методы измерения параметров элементов

В измерительной практике используют разнообразные измерительные мосты. Для измерения омического сопротивления получили распространение мосты постоянного и переменного тока. Различают схемы одинарных и двойных мостов постоянного тока.

10.3.1. Мосты постоянного тока

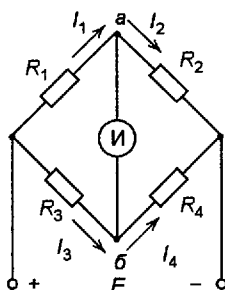


Рис. 10.8. Схема одинарного четырехплечего моста постоянного тока

Одинарный мост постоянного тока (рис. 10.8) состоит из четырех резисторов R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , образующих четыре плеча схемы, источника питания E и индикатора I .

Условием баланса (уравновешивания) такого моста является отсутствие тока через индикатор I , что обеспечивается равенством произведений величин сопротивлений противоположных плеч моста:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3, \quad (10.15)$$

$$R_x = R_4 = \frac{R_2}{R_1} R_3. \quad (10.16)$$

Равновесие моста достигается изменением R_3 и отношения R_2/R_1 . Отношение сопротивлений R_2/R_1 называют масштабным множителем, его значение выбирается равным 10^n , где n — целое положительное или отрицательное число с переходом через нуль. Плечо R_3 моста в этом случае называют плечом уравновешивания.

Важным параметром мостовой схемы является чувствительность, т.е. минимальное изменение измеряемого сопротивления R_x , которое вызывает нарушение баланса схемы, регистрируемого гальванометром. Чувствительность схемы зависит не только от чувствительности гальванометра, но и от сопротивлений резисторов, входящих в состав его плеч.

Сопротивление плеч моста рекомендуется выбирать попарно равноплечими или использовать полностью равноплечий мост, т.е. мост, для которого $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$.

Одинарные четырехплечие мосты применяют для измерения сравнительно больших сопротивлений, от десятков Ом и выше. При измерении малых сопротивлений возникают погрешности, обусловленные влиянием сопротивлений соединительных проводов.

Уменьшение влияния сопротивления контактов и соединительных проводов можно обеспечить схемным решением. Так, при измерении сопротивлений, меньших 10 Ом, используют четырехзажимное включение R_x .

Для измерения малых сопротивлений используют также двойные измерительные мосты (мост Томсона), где схемным путем практически исключается влияние соединительных проводов на результат измерения.

10.3.2. Мосты переменного тока

Метод измерительного моста переменного тока находит широкое применение для измерения омического сопротивления, емкости, тангенса угла потерь, индуктивности, добротности.

В отличие от мостов постоянного тока здесь в одну диагональ моста включен источник переменного напряжения (генератор низкой частоты), в другую — нулевой индикатор переменного напряжения, плечи моста — двухполюсники с полным сопротивлением Z (рис. 10.9).

Равновесие моста достигается при условии равенства произведений комплексных сопротивлений противоположных плеч:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3. \quad (10.17)$$

В показательной форме равенство будет иметь

вид

$$|Z_1| |Z_4| e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = |Z_2| |Z_3| e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}, \quad (10.18)$$

где $|Z_1|$, $|Z_2|$, $|Z_3|$, $|Z_4|$ — модули полных сопротивлений плеч; φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 — фазовые сдвиги между током и напряжением в соответствующих плечах, $\varphi_i = \arctg(x_i/R_i)$; x_i — реактивная составляющая комплексного сопротивления; R_i — активная составляющая комплексного сопротивления i -го плеча.

Равенство (10.18) представим в виде двух равенств:

- равенство произведений модулей комплексных сопротивлений противоположащих плеч:

$$|Z_1| |Z_4| = |Z_2| |Z_3|; \quad (10.19)$$

- равенство сумм аргументов комплексных сопротивлений противоположных плеч:

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (10.20)$$

Равенства (10.19) и (10.20) определяют условия равновесия моста. Они показывают, что мост переменного тока нужно уравнивать регулировкой активной и реактивной составляющих плеч, т.е. равновесие осуществляется по модулям и фазам. При этом уравнения (10.19) и (10.20) равносильны и оба обязательны для достижения равновесия моста. Условие (10.20) указывает, при каком расположении плеч в зависимости от их характера можно уравновесить схему. Если смежные плечи, например третье и четвертое (см. рис. 10.9), имеют чисто активные сопротивления R_3 и R_4 , т.е. $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, то два других смежных плеча могут иметь или индуктивный, или емкостный характер. Если противоположные плечи чисто активные, то одно из двух других сопротивлений должно быть индуктивным, а другое — емкостным.

При алгебраической форме представления комплексного сопротивления

$$Z = R + jX,$$

где R — вещественная часть, представляющая активную составляющую; X — мнимая часть, представляющая реактивную составляющую.

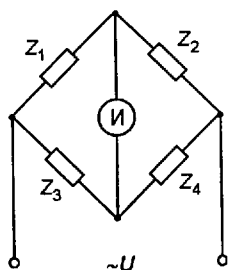


Рис. 10.9. Схема моста переменного тока

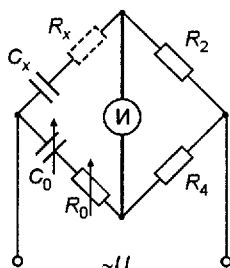


Рис. 10.10. Схема моста для измерения емкости

В алгебраической форме равенство (10.18) запишется в следующем виде:

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3). \quad (10.21)$$

Это равенство обеспечивается при одновременном выполнении равенства активных и реактивных частей, т.е.

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3$$

и

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2.$$

Широкое практическое применение получили мосты, содержащие два комплексных плеча, обеспечивающие раздельность отсчетов, т.е. когда по значению одного из регулируемых параметров элементов моста определяется значение измеряемой величины. Такие мосты обеспечивают также независимость условия равновесия от частоты.

Рассмотрим мост для измерения емкости и угла потерь конденсаторов (рис. 10.10). Два его плеча составлены из магазинов сопротивлений R_2 и R_4 . Третье плечо образовано последовательно соединенными образцовыми конденсатором C_0 и переменным резистором с малым сопротивлением R_0 . Образцовый конденсатор выбирается с малыми потерями, которыми можно пренебречь. В третье плечо включен измеряемый конденсатор C_x , сопротивление потерь в котором R_x .

Полные сопротивления плеч в данной схеме определяются следующими равенствами:

$$Z_1 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}; \quad Z_2 = R_2; \quad Z_3 = R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}; \quad Z_4 = R_4.$$

Согласно формуле равновесия моста (10.17) имеем

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) R_4 = \left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0} \right) R_2,$$

или

$$R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = R_0 \frac{R_2}{R_4} + \frac{1}{j\omega C_0} \frac{R_2}{R_4}.$$

Приравняв отдельно вещественные и мнимые части, имеем

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_4}; \quad C_x = C_0 \frac{R_4}{R_2}. \quad (10.22)$$

Из анализа векторной диаграммы цепи $r_x C_x$ (см. табл. 3.1) следует, что угол потерь δ_x , дополняющий до 90° φ_x , определяется выражением $\operatorname{tg} \delta_x = \omega r_x C_x$.

В качестве регулируемых элементов мостов чаще всего используют резисторы, так как они проще и дешевле по сравнению с регулируемой емкостью и магазином индуктивностей.

Процедура уравнивания моста сводится к следующему:

- изменяя величину R_0 , следует добиться минимума показания индикатора за счет равенства действительных частей уравнения;
- изменяя отношение R_2/R_4 (за счет R_2 или R_4), следует вновь добиться минимума показания индикатора за счет выравнивания мнимых частей уравнения, но так как R_2 (R_4) входит в выражение для действительной части, то нарушается первоначальное условие равновесия действительных частей;
- изменяя R_0 , вновь добиться равновесия действительных частей.

Таким образом, поскольку при изменении или только активных, или только реактивных составляющих одновременно изменяются значения и активных, и реактивных составляющих, то процедура регулировки является многоступенчатой.

Число поочередных регулировок обоих параметров характеризует сходимость моста, т.е. быстроту достижения равновесия, которая определяется схемой и конструкцией мостов.

Процессы уравнивания моста переменного тока для измерения индуктивности катушки рассмотрим на примере схемы, представленной на рис. 10.11. Здесь для измерения индуктивности L_x используют образцовый конденсатор C_0 , включаемый в плечо, противоположное плечу с измеряемой индуктивностью. Параллельно с конденсатором C_0 включают резистор R_0 . В остальные два плеча включают магазины сопротивлений R_2 и R_3 .

Полные сопротивления плеч определяются равенствами

$$Z_1 = R_x + j\omega L_x; \quad Z_2 = R_2;$$

$$Z_3 = R_3; \quad Z_4 = \frac{R_0}{1 + j\omega C_0 R_0}.$$

Равновесие моста определяется следующим равенством:

$$\frac{(R_x + j\omega L_x)R_0}{1 + j\omega C_0 R_0} = R_2 R_3,$$

из которого следует, что

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_0}; \quad L_x = C_0 R_2 R_3; \quad Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_0 R_0.$$

На основании изложенного можно заключить, что для мостов, у которых два плеча содержат только активные сопротивления, а два других — реактивные (см. рис. 10.10, 10.11), справедливы следующие утверждения:

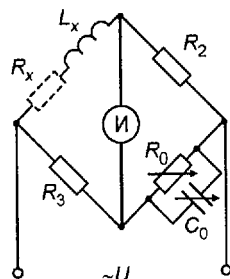


Рис. 10.11. Схема моста для измерения индуктивности

- если активные сопротивления находятся в смежных плечах (рис. 10.10) R_2 и R_4 и $\varphi_2 = \varphi_4 = 0$, то два других плеча должны содержать сопротивления одного характера (индуктивного или емкостного), что обеспечивает выполнение условия $\varphi_1 = \varphi_3$;
- если активные сопротивления расположены в противоположных плечах (рис. 10.11) R_2 и R_3 и $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$, то характер сопротивлений двух других плеч должен быть противоположным, что обеспечивает выполнение условия $\varphi_1 = -\varphi_4$.

Погрешности измерений параметров цепей с использованием рассматриваемых мостов составляет десятые и сотые доли процента от измеряемой величины.

Эти погрешности определяются следующими основными причинами: погрешностью значений образцовых элементов схемы моста; влиянием паразитных связей между элементами схемы; влиянием нестабильности параметров элементов схемы; нестабильностью частоты источника переменного напряжения и др.

Паразитные емкостные связи между элементами моста возрастают при увеличении частоты источника, что ограничивает применение таких измерительных мостов. На высоких частотах (десятки и сотни мегагерц) практическое применение получили так называемые Т-образные мосты.

10.3.3. Трансформаторные мосты

Типовая схема трансформаторного моста представлена на рис. 10.12. Обмотки трансформатора напряжения Тр1 включают согласовано, а обмотки трансформатора тока Тр2 — встречно.

При включенном источнике переменного напряжения E через Тр1 осуществляется питание моста. За счет токов I_x и I_0 , протекающих через обмотки W_1, W_2, W_3, W_4 , на образцовом сопротивлении Z_0 и измеряемом сопротивлении Z_x происходит падение напряжения. Изменяя число витков n_3, n_4 , можно добиться уравнивания моста, т.е. нулевого показания вольтметра V .

Условие равновесия моста:

$$I_x n_3 = I_0 n_4. \quad (10.23)$$

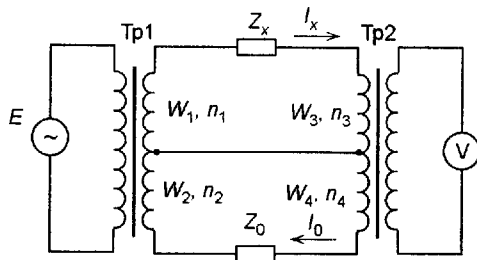


Рис. 10.12. Схема трансформаторного моста

Учитывая, что

$$I_x = E \frac{n_1}{n_1 + n_2} \frac{1}{Z_x},$$

$$I_0 = E \frac{n_2}{n_1 + n_2} \frac{1}{Z_0},$$

уравнение равновесия моста (10.23) примет вид

$$Z_x = Z_0 \frac{n_1 n_3}{n_2 n_4}. \quad (10.24)$$

Из (10.24) следует, что условие равновесия трансформаторного моста определяется отношением числа витков, на которое не влияют внешние факторы. При постоянном значении образцового сопротивления R_0 можно обеспечить широкие пределы измерений за счет изменения количества витков в трансформаторах $Tr1$ и $Tr2$. Трансформаторные мосты обеспечивают относительную погрешность в диапазоне звуковых частот 0,001...0,01 %. На основе трансформаторных измерительных мостов реализованы измерители индуктивности (ЕЗ-3) и измерители емкости (Е8-4).

10.4. Цифровые измерители параметров элементов электрических цепей

Цифровые измерители имеют хорошую возможность сопряжения с другими цифровыми приборами и средствами вычислительной техники и, следовательно, могут работать в составе информационно-измерительных систем.

Достаточно широкое применение при реализации цифровых измерителей параметров элементов электрических цепей получили метод дискретного счета и метод уравнивающего преобразования.

10.4.1. Метод дискретного счета

Основой данного метода является преобразование измеряемого параметра в пропорциональный ему временной интервал с последующим измерением длительности интервала путем его заполнения последовательностью коротких импульсов.

Реализацию метода рассмотрим на примере измерения величины омического сопротивления R_x .

Структурная схема цифрового измерителя с аperiodическим разрядом образцовой емкости (C) через измеряемый резистор (R_x) приведена на рис. 10.13,а, где СУ — сравнивающее устройство; ТР — триггер; ВС — временной селектор; УУ — управляющее устройство; ГСИ — генератор счетных импульсов; ЭС — электронный счетчик; Е — источник электропитания.

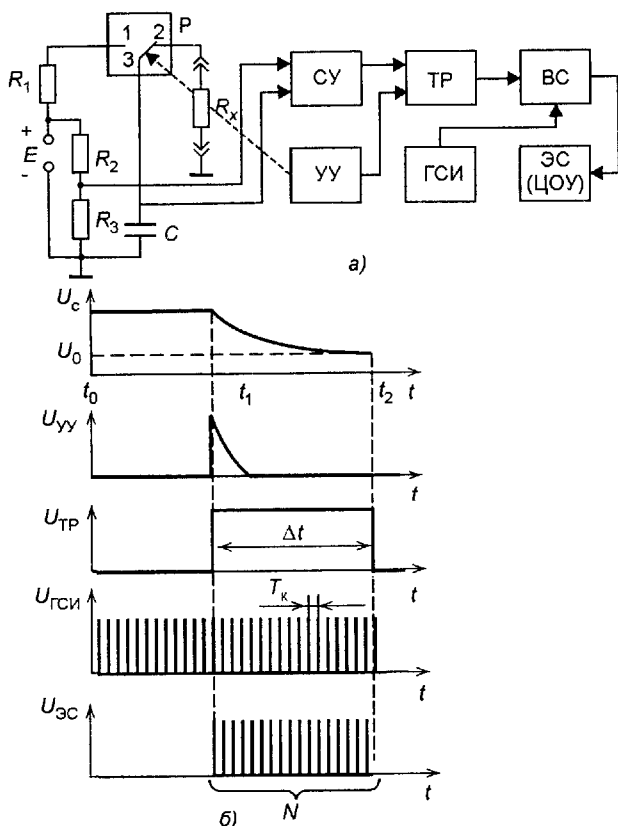


Рис. 10.13. Цифровой измеритель параметров элементов электрических цепей: а — схема; б — временные диаграммы

Принцип действия схемы омметра поясним временными диаграммами (рис. 10.13, б). До начала измерений (в момент t_0) УУ через контакты 1–3 реле P подключает конденсатор C к источнику электропитания E , который заряжает его до напряжения U_c . Генератор счетных импульсов вырабатывает тактовые импульсы с периодом T_k .

В момент начала измерений (t_1) УУ обеспечивает срабатывание реле P и, как следствие, замыкание контактов 3–2. Конденсатор C начинает разряжаться через замкнутые контакты 3–2 реле P и измеряемый резистор R_x . Одновременно с замыканием контактов 3–2 реле УУ переводит триггер в состояние «1», который в свою очередь открывает временной селектор, начинается формирование временного интервала Δt , а также подсчет тактовых импульсов.

В момент времени t_2 , когда напряжение разряда конденсатора C станет равным опорному напряжению (U_0), снимаемому с резистора R_3 , срабатывает СУ и переводит ТР в состояние «0».

Временной селектор закрывается, прекращаются подсчет импульсов и формирование временного интервала Δt . При этом величина Δt будет пропорциональна постоянной времени τ_p разряда конденсатора C через R_x и количеству импульсов счета N :

$$\Delta t = \tau_p = CR_x = NT_K,$$

откуда $R_x = NT_K/C_0 = KN$, где K — коэффициент пропорциональности.

Погрешность измерения в рассматриваемом случае зависит в основном от нестабильности элементов схемы (R_1, R_2, R_3, C), нестабильности ГСИ и составляет 0,1...0,2 %.

10.4.2. Метод уравнивающего преобразования

Метод уравнивающего преобразования основан на сравнении измеряемой величины (R_x, L_x, C_x) с образцовой. При этом в качестве схемы сравнения часто используют мостовые трансформаторные или мостовые RLC -схемы.

В RLC -мостовых схемах одно или несколько уравнивающих плеч моста выполняют в виде устройства, в котором происходит ступенчатое изменение значения R или C .

Принцип действия уравнивающего моста рассмотрим на примере схемы представленной на рис. 10.14.

Измеряемая емкость C_x , элементы C, R и элементы преобразователя кода ПК образуют мост, в одну диагональ которого подается сигнал от источника переменного напряжения, например частотой 1000 Гц. Разбаланс моста фиксируется устройством сравнения УС, сигнал с выхода которого подается на устройство управления УУ. В зависимости от знака и величины разбаланса УУ вырабатывает цифровой кодовый сигнал, подаваемый на ПК. В последнем в соответствии с поступающей от УУ кодовой комбинации происходит подключение в схему моста соответствующих уравнивающих элементов, обеспечивающих в общем случае раздельное и независимое уравнивание двух независимых составляющих конкретного сопротивления Z_x .

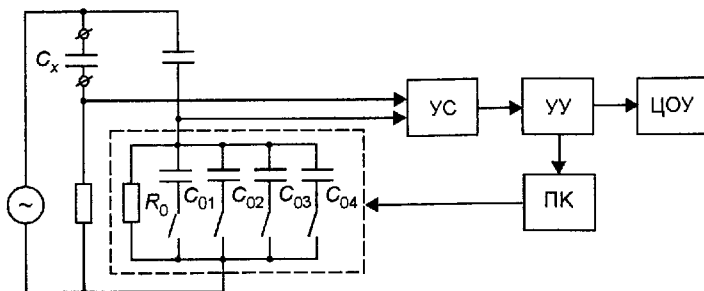


Рис. 10.14. Схема цифрового уравнивающего моста

По способу уравнивания различают схемы с однонаправленным и следящим уравниванием.

В мостовых схемах с однонаправленным уравниванием подбор уравнивающих элементов происходит по определенной программе. Процесс уравнивания начинается с подключения элементов, соответствующих старшим разрядам кода, и заканчивается подключением элементов, соответствующих младшим разрядам кода.

При следящем уравнивании балансировка моста может начинаться с подключения любых значений уравнивающих элементов, и процесс уравнивания может меняться в любую сторону.

Рассматриваемые схемы обеспечивают погрешность измерения параметра около 0,01 %.

10.5. Резонансный метод измерения параметров конденсаторов и катушек индуктивностей

Резонансный метод измерения параметров элементов радиотехнических цепей основан на возникновении явления электрического резонанса в колебательном LC -контуре при вполне определенных значениях емкости и индуктивности.

Значение измеряемого параметра определяется исходя из известной формулы

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}.$$

После преобразования получаем зависимости, пригодные для определения емкости C_x и индуктивности L_x :

$$C_x = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L_0}; \quad L_x = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_0}, \quad (10.25)$$

где C_0 , L_0 — известные образцовые элементы; f_0 — резонансная частота контура.

На основе резонансного метода разработаны различные приборы для измерения отдельных параметров компонентов цепей, однако наиболее полно рассматриваемый метод реализуется в измерителях добротности (куметрах). В общем случае куметр позволяет измерять добротность катушек индуктивностей, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторов, полное сопротивление и проводимость двухполюсников и так далее.

Упрощенная схема куметра представлена на рис. 10.15. Основные элементы прибора: перестраиваемый по частоте генератор Γ ; микроамперметр μA ; резистор малого сопротивления R_0 ; образцовый переменный конденсатор C_0 ; вольтметр V .

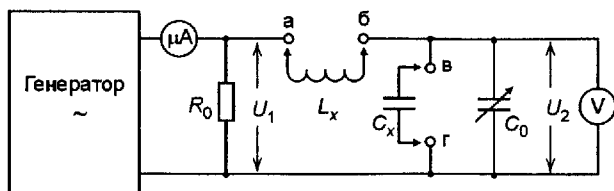


Рис. 10.15. Схема куметра

При измерении индуктивности L_x испытуемая катушка индуктивности подключается к зажимам a и b . Изменением емкости образцового конденсатора C_0 по максимуму показания вольтметра добиваются резонанса контура $L_x C_0$. Отсчитывая C_0 , имеем все данные для определения L_x (10.25).

При измерении емкости конденсатора C_x ($C_x < C_0$) испытуемый конденсатор подключается к зажимам $в, г$, к зажимам $a, б$ подключается катушка с индуктивностью L_0 , тогда

$$C_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_0} - C_0.$$

Определение добротности с помощью куметров основано на свойстве последовательного колебательного контура иметь при резонансе на реактивных элементах напряжение U_2 , в Q раз большее напряжения возбуждения U_1 , т.е.

$$U_2 = U_{C_0} = Q R_0 I = Q U_1,$$

где U_{C_0} — напряжение на конденсаторе C_0 ; I — ток, протекающий через резистор R_0 .

При настройке последовательного колебательного контура в резонанс его добротность

$$Q = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{I R_0} U_2.$$

Поскольку ток, протекающий через резистор R_0 , в процессе измерения поддерживается неизменным, шкалу вольтметра, измеряющего U_2 , можно градуировать в единицах добротности Q . В рассматриваемых схемах используют образцовые конденсаторы с высокой добротностью ($Q_c \gg Q_L$), поэтому с точностью, достаточной для инженерной практики, принято считать, что измеряется добротность катушек индуктивности L_x .

Контрольные вопросы и задания

1. Нарисуйте эквивалентную схему замещения конденсатора и катушки индуктивности с малыми потерями.
2. Что такое угол диэлектрических потерь и чем он определяется для конденсаторов и катушек индуктивности?

3. Что такое добротность конденсатора и катушки индуктивности и чем она определяется?
4. Почему на одной шкале типового аналогового омметра, обозначенной « $k\Omega$ », нулевая отметка находится в правой части шкалы, а на другой шкале, обозначенной « Ω » — в левой?
5. Почему омметр с последовательным и параллельным соединениями измеряемого сопротивления и стрелочного индикатора перед измерением нуждается в калибровке?
6. Почему для омметра, где в качестве измерительного механизма используется магнитоэлектрический логометр, не требуется калибровка перед измерением?
7. Как при измерении малых сопротивлений методом вольтметра и амперметра можно исключить влияние сопротивления амперметра, а при измерении больших сопротивлений исключить влияние сопротивления вольтметра?
8. Нарисуйте схему измерения конденсатора малой емкости методом вольтметра и амперметра.
9. Что должен показать электронный омметр, если замкнуть его входные измерительные гнезда?
10. Назовите условия уравнивания (баланса) моста постоянного и переменного токов.
11. Дайте определение чувствительности мостовой схемы.
12. Вычертите схемы мостов переменного тока для измерения индуктивностей и емкостей, если смежные плечи имеют чисто активные сопротивления, запишите условия равновесия мостов.
13. Объясните назначение мостов постоянного и переменного токов.
14. Дайте определение сходимости моста переменного тока.
15. Поясните сущность метода дискретного счета при измерении параметров элементов электрических цепей.
16. Почему резонансный метод измерения индуктивности и емкости называют косвенным?

Анализаторы спектра сигналов

Методы спектрального анализа получили широкое распространение при эксплуатации различных радиоэлектронных изделий. Это объясняется тем, что во многих практических случаях возникает потребность представления сигналов не только во временной, но и в частотной области и измерения на этой основе параметров этих сигналов.

11.1. Общие сведения о спектрах сигналов

В математике и теории сигналов показано, что при выполнении определенных условий произвольная функция $x(t)$ может быть представлена обобщенным рядом Фурье:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(t), \quad (11.1)$$

где

$$C_n = \frac{1}{\|\varphi_n\|^2} \int_{t_1}^{t_2} x(t) \varphi_n(t) dt, \quad \|\varphi_n\| = \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} \varphi_n^2(t) dt}.$$

Совокупность коэффициентов C_n ряда принято называть спектром сигнала $x(t)$, а $\|\varphi_n\|$ — нормой функции.

Считается, что коэффициенты C_n полностью определяют функцию $x(t)$ на отрезке $[t_1, t_2]$ и образует функциональный базис в функциональном пространстве, если в системе $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_n(t)$ ни одна из функций не равна тождественно нулю, т.е. $\|\varphi\| \neq 0$ для всех n , и все пары функций $\varphi_n(t)$ и $\varphi_m(t)$ ортогональны, т.е.

$$(\varphi_n, \varphi_m) = \int_{t_1}^{t_2} \varphi_n(t) \varphi_m(t) dt = 0$$

при $n \neq m$.

В спектральной теории радиотехнических сигналов наибольшее распространение получили системы, в основу которых положен тригонометрический базис. В этом случае любая периодическая функция вида (11.1), т.е. для которой в общем случае выполняется условие

$$x(t) = x(t + nT),$$

где T — период, n — любое целое число, может быть представлена рядом Фурье одним из следующих видов:

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n (\cos n\omega t - \varphi_n); \quad (11.2)$$

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t); \quad (11.3)$$

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(\gamma n\omega t), \quad (11.4)$$

где

$$\omega = 2\pi/T; \quad C_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt;$$

$$a_n = c_n \cos \varphi_n; \quad b_n = c_n \sin \varphi_n; \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad \varphi_n = \arctg(b_n/c_n);$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega t dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega t dt;$$

$$A_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \exp(-\gamma n\omega t) dt.$$

Из (11.2), (11.3), (11.4) следует, что спектр периодической функции $x(t)$ имеет дискретный по частоте спектр. Совокупность коэффициентов C_n называется амплитудно-частотным спектром, а совокупность φ_n — фазо-частотным спектром.

Для спектрального анализа непериодических сигналов используется интеграл Фурье. Прямое преобразование Фурье позволяет переходить из временной области в частотную:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-\gamma \omega t) dt. \quad (11.5)$$

Обратное преобразование Фурье наоборот обеспечивает переход из частотной области во временную:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp(\gamma \omega t) d\omega. \quad (11.6)$$

В целом оба преобразования связывают между собой вещественную функцию времени $x(t)$ и комплексную функцию $S(\omega)$.

Из (11.5) следует, что спектр непериодических функций является сплошным. Модуль $A(\omega) = |S(\omega)|$ называют амплитудным спектром.

Учитывая, что реальный сигнал наблюдается в реальном времени, используется понятие текущего и мгновенного спектра.

Текущий спектр определяется как

$$S(\omega, t) = \int_0^t x(v) \exp(-\gamma \omega v) dv, \quad (11.7)$$

а мгновенный спектр

$$S(\omega, t) = \int_{t-T}^t x(v) \exp(-\gamma \omega v) dv. \quad (11.8)$$

Равенством (11.8) определяется спектр процесса T , предшествующего моменту времени t . Этот спектр и измеряется анализаторами спектра.

Понятия текущего (11.7) и мгновенного (11.8) спектра позволяют в определенной мере проследить взаимосвязь между идеальным спектром (11.5) и спектром периодического сигнала (11.2). Так спектр непериодического сигнала в виде одиночного импульса является сплошным. Для периодического сигнала (11.1), когда время его анализа T_a (наблюдение) значительно больше периода следования импульсов ($T_{a3} \gg T$), спектр линейчатый. Спектр пачки импульсов (11.1), т.е. периодической последовательности, наблюдаемой на ограниченном интервале времени ($T_{a2} < T_{a3}$), занимает промежуточное положение. Оставаясь сплошным, он имеет выраженные максимумы на частотах дискретного спектра. Отличие мгновенного спектра от идеального зависит от того, насколько полно успевают проявиться особенности сигнала на интервале анализа T_a , т.е. определяется соотношением между T_a и периодом сигнала.

11.2. Фильтровые анализаторы спектра

Принцип действия анализатора спектра параллельного (одновременного) типа поясняется рис. 11.1. В состав анализатора входят следующие основные элементы:

- аттенюатор, предназначенный для согласования входного сопротивления анализатора с выходным сопротивлением источника сигнала и изменения уровня входного сигнала;
- полосовые фильтры ПФ с полосой пропускания $\Delta f_{\text{пф}}$, предназначенные для выделения участка спектра исследуемого сигнала, попадающего в полосу пропускания соответствующего фильтра;
- детекторы Дет, предназначенные для получения огибающей сигнала на выходах соответствующих полосовых фильтров;
- индикатор Инд для отображения спектра исследуемого сигнала.

Входной сигнал $U(t)$, поступающий на вход анализатора после согласования по уровню, разделяется полосовыми фильтрами.

Напряжение с выхода каждого фильтра после детектирования подается через коммутатор на индикатор.

Количество фильтров n , необходимых для работы анализатора,

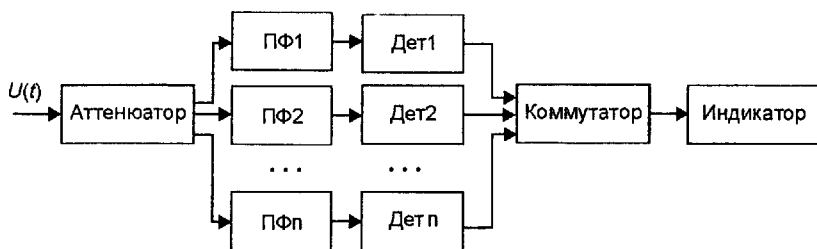


Рис. 11.1. Структурная схема анализатора спектра параллельного типа

определяется равенством

$$n = \frac{\Delta f_c}{\Delta f_{\text{пф}}}, \quad (11.9)$$

где Δf_c — полоса частот анализируемого сигнала.

Время анализа параллельного анализатора (T_a) определяется временем установления напряжения на выходе фильтра и зависит от полосы пропускания ПФ: $T_a \geq 1/\Delta f_{\text{пф}}$. Принято считать, что

$$T_a = (2 \dots 10) \Delta f_{\text{пф}}^{-1}. \quad (11.10)$$

Скорость параллельного анализа зависит от числа фильтров в анализаторе

$$V_a = n \Delta f_{\text{пф}} / T_a = n (\Delta f_{\text{пф}})^2.$$

Такие анализаторы могут измерять спектры любых сигналов, за короткое время позволяют анализировать весь спектр сигнала, но из-за большого числа фильтров сложны при реализации и обладают большими габаритными размерами.

К недостатку параллельного анализатора следует отнести также значительные затраты на реализацию n идентичных каналов обработки (фильтров).

Указанные затраты снижаются в фильтровых анализаторах последовательного типа.

11.2.1. Анализаторы спектра последовательного типа с перестраиваемым фильтром

Принцип действия анализатора спектра последовательного типа состоит в выделении отдельных составляющих спектра исследуемого сигнала с помощью одного полосового фильтра путем перестройки его резонансной частоты.

Основными элементами анализатора спектра с перестраиваемым полосовым фильтром являются аттенюатор, перестраиваемый полосовой фильтр ПФ, детектор Дет, индикатор, генератор линейно изменяющегося напряжения ГЛИН (рис. 11.2). В рассматриваемой схеме закономерность изменения резонансной частоты полосового фильтра и на-

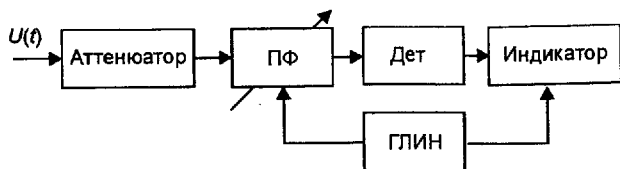


Рис. 11.2. Структурная схема анализатора с перестраиваемым фильтром

пряжение развертки индикатора определяются одним устройством — ГЛИН, что обеспечивает своевременный вывод амплитуды соответствующей гармоники на горизонтальную линию индикатора.

В таких анализаторах можно исследовать только сигналы, спектр которых за время анализа, т.е. за время перестройки фильтра в полосе обзора, не изменяется. Это периодически повторяющиеся сигналы.

В анализаторах спектра с перестраиваемым полосовым фильтром снимается конструктивная избыточность, присущая анализаторам параллельного типа. Однако перестройка резонансной частоты полосового фильтра приводит к изменению его добротности (добротности контура), что в свою очередь приводит к изменению амплитуды отклика и полосы пропускания. Этот недостаток устраняется в гетеродинных схемах с не перестраиваемым полосовым фильтром.

11.2.2. Фильтровые гетеродинные анализаторы спектра последовательного типа

Принцип действия данного анализатора состоит в выделении отдельных составляющих спектра таким образом, что в полосу пропускания полосового не перестраиваемого фильтра по очереди попадают спектральные составляющие с различными частотами. Это достигается введением в схему анализатора управляемого гетеродина, смесителя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ). Кроме того, в состав рассматриваемой схемы входят аттенюатор, ГЛИН, детектор, индикатор и калибратор, состоящий из генератора и модулятора (рис. 11.3).

Сигнал с аттенюатора поступает на смеситель и одновременно с ним на смеситель поступает сигнал с генератора качающейся частоты (гетеродина), частота которого изменяется во времени по линейному закону. Гетеродин настраивается таким образом, чтобы его средняя частота была близка к несущей частоте исследуемого сигнала. Линейная генерация по частоте осуществляется с помощью специального генератора пилообразного напряжения.

Это напряжение поступает также в канал горизонтального отклонения индикатора, т.е. перестройка частоты гетеродина синхронизирована с движением пятна на экране ЭЛТ. Преобразованный сигнал с выхода смесителя усиливается в УПЧ. После детектирования выделенный сигнал поступает на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ, что позволяет представить горизонтальную ось ЭЛТ в частотном масштабе. Чем

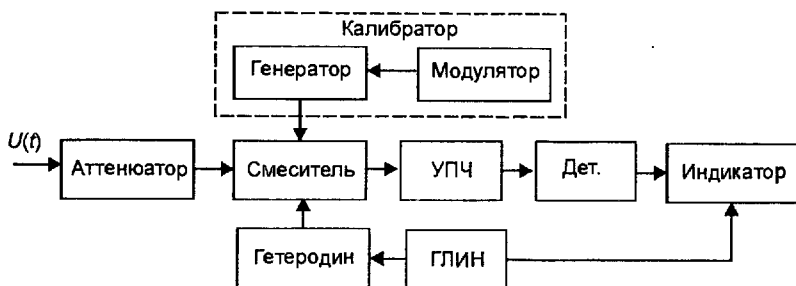


Рис. 11.3. Структурная схема гетеродинного анализатора спектра

больше амплитуда выделенного в УПЧ сигнала (гармоники), тем больше отклонение луча в вертикальном направлении. Высота изображения линии на экране будет пропорциональна среднему значению мощности соответствующего участка спектра в полосе частот, пропускаемых УПЧ, если детектор среднеквадратических значений.

Рассматриваемая схема анализатора представляет по сути комбинацию супергетеродинного приемника и электронного осциллографа. Супергетеродинный приемник при этом выполняет роль узкополосного автоматически перестраиваемого фильтра. Перестройка осуществляется за счет изменения частоты гетеродина, что эквивалентно перемещению спектра исследуемого сигнала по шкале частот относительно средней частоты настройки узкополосного фильтра. Благодаря синхронной работе гетеродина и разверток осциллографа на экране ЭЛТ можно наблюдать амплитудно-частотный спектр исследуемого сигнала.

Из рассмотренного следует, что горизонтальная ось на экране ЭЛТ является одновременно как бы осью времени и осью частот. Диаграммы, поясняющие работу анализатора, показаны на рис. 11.4.

На рис. 11.4,а показаны спектры радиоимпульсов, поступающих на вход анализатора в моменты $t_1, t_2, \dots, t_6$. На рис. 11.4,б представлен график изменения частоты гетеродина во времени $f_c(t)$. В текущий момент времени на индикаторе отображаются светящиеся полосы, высота которых, в зависимости от используемого детектора пропорциональна амплитуде или мощности исследуемого сигнала (рис. 11.4,в).

Количество наблюдаемых полос будет определяться числом импульсов, поступающих в анализатор за время одного периода развертки осциллографа. Этих полос будет тем меньше, чем больше частота следования импульсов F_c и меньше частота развертки F_p . При многократном повторении исследуемых импульсов формируется устойчивое изображение спектра.

Огибающая полосок соответствует огибающей спектра исследуемого сигнала. Вместе с тем характер отображаемого на экране спектра определяется метрологическими характеристиками анализатора; полосой пропускания фильтра Δf ; разрешающей способностью по частоте Δf_p ; временем (продолжительностью) анализа T_a .

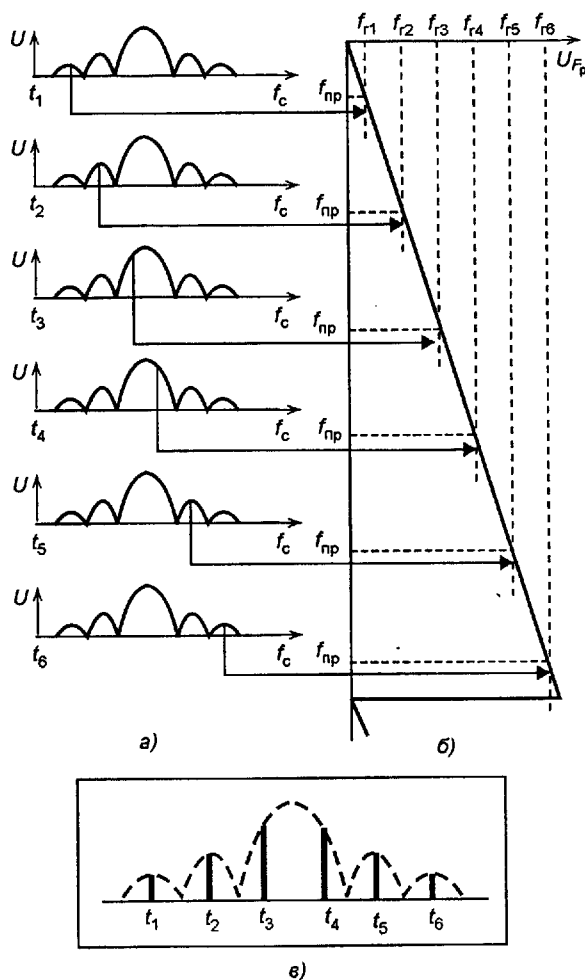


Рис. 11.4. Диаграммы, поясняющие работу гетеродинного анализатора: а — спектр сигнала на входе анализатора; б — график изменения частот гетеродина во времени; в — изображение спектра на экране анализатора

Разрешающая способность анализатора, т.е. его способность различать составляющие спектра с близкими частотами, определяется как минимальное расстояние по оси частот между двумя составляющими спектра, при котором могут быть выделены отдельные линии и измерены их уровни.

Обычно при определении Δf_p допускается, чтобы амплитуда в точке перекрытия двух соседних составляющих спектра (амплитуда провала) составляла 50 % уровня максимального значения амплитуды составляющих.

Для рассматриваемого гетеродинного анализатора важно различать статическую и динамическую разрешающую способность. Статическая Δf_p имеет место при отсутствии переходных процессов в фильтре УПЧ. Для одиночного контура она определяется по формуле

$$\Delta f_p = \sqrt[3]{\Delta f}. \quad (11.11)$$

Динамическая разрешающая способность анализатора зависит от скорости перестройки частоты гетеродина (см. рис. 11.4).

Если время переходного процесса в фильтре соизмеримо с временем изменения частоты колебаний на его входе в диапазоне, соответствующем полосе пропускания фильтра, то разрешающая способность анализатора будет ухудшаться и возникнут искажения изображения спектра. Ухудшения разрешающей способности (уменьшения Δf_p) обеспечивается в анализаторах с многократным преобразованием частоты. Полоса пропускания в этом случае определяется последней ступенью тракта промежуточной частоты.

Заметим, что в анализаторах рассматриваемого типа, уменьшение Δf , а следовательно, увеличение разрешающей способности приводит к увеличению времени анализа T_a .

Действительно, для обеспечения динамической составляющей погрешности анализа в допустимых пределах, необходимо чтобы время установки колебаний в полосовом фильтре было обратно пропорционально Δf . В полосе обзора $\Delta F = f_{\max} - f_{\min}$ суммарное время анализа увеличится в $n = \Delta F / \Delta f$ раз, следовательно,

$$T_a \approx K \frac{\Delta F}{\Delta f^2}, \quad (11.12)$$

где $K = 2...5$ — коэффициент пропорциональности, определяемый характеристикой фильтра.

Таким образом, по формуле (11.12) можно приблизительно определить время анализа (время развтки) при котором не будет динамических искажений.

В фильтровых анализаторах для уменьшения T_a используется способ ускорения анализа спектра, основанный на автоматическом управлении скоростью перестройки гетеродина.

Суть способа состоит в том, что при высокой избирательности УПЧ, интервал времени между линиями спектра значительно превышает Δf , что дает возможность увеличивать скорость изменения частоты гетеродина в промежутках между спектральными линиями. В качестве управляющего сигнала используется напряжение, снимаемое с выхода детектора.

Для определения некоторых параметров спектра в анализаторе обычно предусматривается калибратор. От калибратора на смеситель поступает частотно-модулированное колебание. Модулирующее напряжение калибратора гармоническое, поэтому спектр сигнала имеет дис-

кретный вид. Дискретные составляющие отстоят друг от друга на частоту модуляции F_m . Изменяя частоту модулирующего колебания можно изменять расстояние между спектральными линиями, а при перестройке частоты генератора можно перемещать весь спектр вдоль оси.

Если генератор и модулятор калибратора снабдить шкалой для отсчета частоты, то можно будет измерять частоты, соответствующие заданной точке на горизонтальной оси ЭЛТ. Для этого спектр калибровочного сигнала накладывается на спектр анализируемого сигнала.

Улучшение метрологических характеристик и процесса автоматизации измерений параметров спектра сигнала в фильтровых анализаторах последовательного типа может обеспечиваться за счет их функционального и схемного объединения с электронно-счетными частотомерами (ЭСЧ) и цифровыми вольтметрами (ЦВ). Также анализаторы называют анализаторами с цифровым отсчетом (например СЧ-74, СУ-56).

В таких анализаторах для взаимодействия с элементами схем ЭСЧ и ЦВ с целью измерения частоты и уровня отдельных спектральных составляющих сигнала, создают высокостабильные тракты обработки и преобразования сигналов.

Измерение уровня сигнала проводится квазистатическом режиме с помощью маркера (метки), устанавливаемого в нужную точку вершины исследуемого спектра сигнала. Перестройка выходного напряжения гетеродина на время измерения приостанавливается.

При измерении частоты спектральных составляющих сигнала перестройка гетеродина также останавливается. Частота гетеродина в момент остановки известна и равна f_r . В анализаторах с однократным преобразованием частоты по известной промежуточной частоте $f_{пр}$ и f_r может определяться частота исследуемой спектральной составляющей

$$f_{сч} = f_{пр} - f_r. \quad (11.13)$$

Для автоматической реализации условия (11.13) в анализаторах устанавливают автономный генератор промежуточной частоты и смеситель.

11.3. Цифровые анализаторы спектра (ЦАС)

В настоящее время широко распространены цифровые методы анализа спектра, основой которых является преобразование исследуемого сигнала в цифровой ход и вычисление составляющих спектра с помощью цифровых вычислительных устройств. Рассмотрим некоторые разновидности ЦАС.

11.3.1. Цифровой анализатор со сжатием сигнала во временной области

В таких анализаторах при небольшом времени анализа за счет искусственного расширения спектра исследуемого сигнала удается обеспечить высокую разрешающую способность. Расширение спектра при этом реализуется в цифровой форме.

Суть положительного эффекта такого анализатора можно пояснить на основе формулы (11.12), из которой следует, что если искусственно в n раз расширить спектр сигнала ($n\Delta F$) и в n раз увеличить полосу пропускания ($n\Delta f$), то продолжительность анализа сократится в n раз при неизменной разрешающей способности:

$$T'_a = n\Delta F / (n\Delta f)^2 = T_a / n. \quad (11.14)$$

Принцип действия блока сжатия информации (рис. 11.5) строится на предварительном преобразовании сигнала, поступающего на его вход. Из анализируемого сигнала берутся выборки мгновенных значений с частотой, определяемой теоремой Котельникова. С помощью АЦП они преобразуются в цифровой код и последовательно записываются в запоминающее устройство ЗУ.

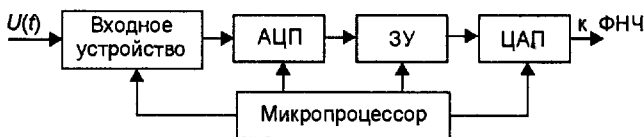


Рис. 11.5. Блок сжатия во временной области

Записанный в ЗУ блок информации считывается, но со скоростью, значительно большей скорости записи ($10^2 \dots 10^4$). Затем считанная информация преобразуется в аналоговую форму. Таким образом, получается сжатая во времени копия сигнала, которая может быть получена анализатором последовательного типа. Спектр сжатой копии и полоса пропускания анализирующего фильтра расширяются. Однако время анализа уменьшается во столько раз, во сколько длительность сжатой копии меньше длительности сигнала, записанного в ЗУ.

Применение временного сжатия сигнала на низких частотах обеспечивает работу анализаторов последовательного типа в реальном времени (анализатор СУ-73).

11.3.2. Анализаторы на цифровых фильтрах

Цифровые фильтры (ЦФ) выполняют операцию частотной фильтрации и позволяют получать при наличии управляющих воздействий различные АЧХ и ФЧХ, обеспечивая высокую стабильность параметров ЦФ, не нуждающуюся в подстройке.

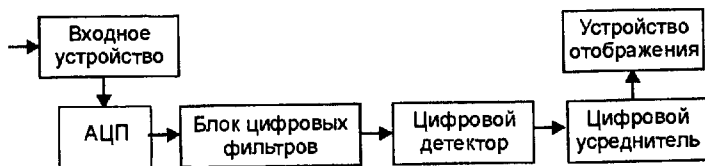


Рис. 11.6. Структурная схема анализатора спектра на цифровых фильтрах

Цифровые фильтры могут быть реализованы как аппаратными, так и программными средствами.

Процедура фильтрации В ЦФ представляет собой определенный алгоритм обработки входного сигнала, в результате чего на выходе фильтра появляются новые цифровые коды, соответствующие результатам фильтрации.

Передаточная функция ЦФ может быть представлена в виде дискретного преобразования Лапласа. Коэффициенты передаточной функции определяют характеристики фильтра, для изменения которых достаточно задать другие значения некоторым коэффициентам, т.е. занести в ячейки памяти новые числа.

Таким образом, результат фильтрации определяется формой анализируемого сигнала и параметрами АЧХ фильтра, зависящими от значений коэффициентов реализуемой передаточной функции фильтра.

Упрощенная схема анализатора спектра на цифровых фильтрах представлена на рис. 11.6. Входной сигнал преобразуется в последовательность кодов, соответствующих числовым значениям сигнала в моменты выборки. Совокупность кодов с выхода цифровых фильтров поступает на цифровой детектор, где рассчитывается среднеквадратическое значение напряжения. После усреднения данных спектр сигнала отображается на экране анализатора в виде спектральных полос.

11.3.3. Анализаторы спектра на основе дискретного преобразования Фурье

Рассмотренное в разд. 11.1 спектральное представление периодических и непериодических сигналов при определенных условиях распространяется и на дискретные сигналы, т.е. на сигналы, полученные из аналоговых путем взятия отсчетов в дискретные моменты времени.

Если периодический или непериодический сигнал $x(t)$ преобразован в дискретный сигнал $S_i = x(i\Delta t)$, определенный на некотором интервале T в моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_{N-1}$, разделенных интервалами $\Delta t = T/n$, то такой дискретный сигнал может быть представлен дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) в прямой и обратной форме:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i\Delta t) \exp \left(-j \frac{2\pi k i}{N} \right); \quad (11.15)$$

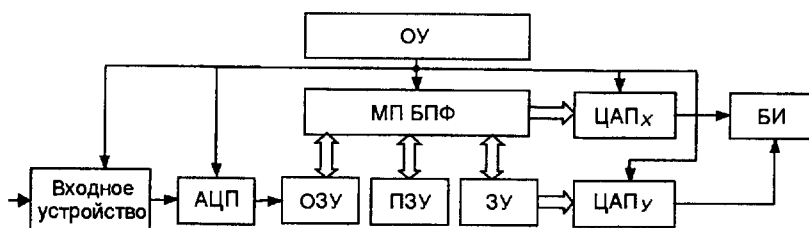


Рис. 11.7. Структурная схема анализатора спектра на основе БПФ

$$S_i = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp \left(-j \frac{2\pi k i}{N} \right), \quad (11.16)$$

где $k = 0, 1, \dots, N-1$; $i = 0, 1, \dots, N-1$; $j = \sqrt{-1}$.

Выражения (11.15) и (11.16) устанавливают взаимнооднозначное соответствие между последовательностью отсчетов S_i и ее спектром C_k .

Особенностью ДПФ является свойство периодичности спектра C_k и временного ряда S_i , что обусловлено процедурой дискретизации. Это свойство создает определенные неудобства при практической реализации ДПФ, что связано с наложением компонентов спектра от соседних периодов. Однако негативный эффект от этого влияния обычно может быть существенно снижен, например, за счет дополнительной фильтрации.

Непосредственное вычисление дискретного спектра по (11.15) является громоздкой вычислительной процедурой, требует выполнения большого числа операций, что предъявляет высокие требования к быстродействию вычислительных средств. Требуется провести N^2 операций умножения и $(N-1)N$ операций сложения с комплексными числами.

Указанные трудности существенно ослабляются при использовании алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Один из таких алгоритмов предусматривает выделение из исходного временного ряда двух промежуточных подпоследовательностей. Спектры этих подпоследовательностей определяются отдельно, а затем находится спектр всего сигнала. Такие алгоритмы БПФ могут дать существенную экономию по сравнению с ДПФ. Для нахождения спектра каждой подпоследовательности требуются $N^2/2$ умножений и $N(N/2-1)/2$ сложений. Применение БПФ позволяет уменьшить число проводимых операций приблизительно в $N/\lg N$ раз.

Рассматриваемый цифровой анализатор содержит микропроцессорную систему, где осуществляются вычисления по алгоритму БПФ (МП БПФ) (рис. 11.7). Исследуемый сигнал может вводиться как в аналоговой, так и в цифровой форме.

Совокупность кодов, соответствующих мгновенным значениям сигналов в моменты дискретизации, запоминаются в ОЗУ. Управление режимами работы МП БПФ осуществляется с устройства управления

УУ. Алгоритм БПФ реализуется по программе, как правило, записанной в ПЗУ. Результаты вычисления запоминаются в ЗУ. Данные из ЗУ далее поступают в ЦАП и канал вертикального отклонения ЭЛТ блока индикации.

Сигналы, соответствующие частотам исследуемого сигнала, обеспечивают через ЦАП развертку на экране ЭЛТ. На экран цифрового дисплея одновременно с изображением спектра может выводиться алфавитно-цифровая информация о значениях различных параметров спектра исследуемого сигнала.

11.4. Измерение параметров спектра сигнала

11.4.1. Измерение параметров АМ сигналов

Если модулирующий сигнал является гармоническим, то математическую модель сигнала, модулированного по амплитуде, можно записать в следующем виде:

$$U_{AM}(t) = U_m(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (11.17)$$

где U_m — амплитуда немодулированного высокочастотного сигнала; $\omega = 2\pi f$, f — несущая частота; $\Omega = 2\pi F$, F — модулирующая частота; M — коэффициент амплитудной модуляции.

Коэффициент амплитудной модуляции является основным параметром АМ колебаний. Он численно равен отношению приращения амплитуды ΔU к амплитудному значению напряжения U_m при отсутствии модуляции:

$$M = \frac{\Delta U}{U_m} 100 \%, \quad (11.18)$$

или

$$M = \frac{U_{\Omega}}{U_m}, \quad (11.18)$$

где U — амплитуда модулирующего напряжения.

Выражение (11.17) можно представить в следующем виде:

$$U_{AM}(t) = U_m \cos \omega t + \frac{MU_m}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{MU_m}{2} \cos(\omega - \Omega)t. \quad (11.20)$$

Спектр, соответствующий $U_{AM}(t)$, имеет вид, показанный на рис. 11.8.

Основываясь на введенной математической модели АМ сигнала, рассмотрим порядок измерения коэффициента амплитудной модуляции с помощью анализатора спектра.

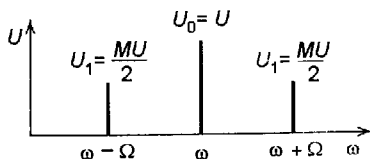


Рис. 11.8. Спектр АМ сигнала

Процедура измерения в данном случае сводится к измерению с помощью анализатора спектра амплитуды спектральной линии на несущей частоте (U_0) и амплитуды спектральной линии на любой из боковых частот (U_1).

Коэффициент амплитудной модуляции определяется отношением

$$M = \frac{2U_1}{U_0}. \quad (11.21)$$

Амплитуды указанных спектральных линий обычно измеряют методом градуированной шкалы, для чего используется калибровочный сигнал.

Погрешность измерения коэффициента амплитудной модуляции определяется по правилам определения погрешностей косвенных измерений с учетом (11.21).

Абсолютная погрешность измерения M

$$\Delta_M = \sqrt{\left(\frac{dM}{dU_0}\right)^2 \Delta U_0^2 + \left(\frac{dM}{dU_1}\right)^2 \Delta U_1^2} = M \sqrt{\delta_{U_0}^2 + \delta_{U_1}^2}, \quad (11.22)$$

относительная погрешность

$$\delta_M = \frac{\Delta_M}{M} = \sqrt{\delta_{U_0}^2 + \delta_{U_1}^2}. \quad (11.23)$$

В свою очередь, погрешности измерения амплитуд спектральных линий U_0 и U_1 определяются рядом составляющих, основными из которых являются:

- погрешность калибровки δ_K ;
- погрешность отсчета $\delta_{от}$, вызванная конечной шириной луча анализатора;
- динамическая погрешность $\delta_{дин}$, вызванная инерционностью фильтрующих устройств анализаторов;
- погрешность измерения, вызванная внешними помехами (шумом).

Учитывая, что в цифровых анализаторах появляется погрешность квантования

$$\delta_{кв} = \frac{\Delta_{кв}}{2A}, \quad (11.24)$$

где $\Delta_{кв}$ — шаг квантования; A — амплитуда сигнала, но практически отсутствует погрешность отсчета, то формулы, определяющие погрешность измерения амплитуд для типовых (аналоговых) анализаторов (δ_A) и цифровых анализаторов, отличаются составляющими погрешностей:

$$\delta_A = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_{от}^2 + \delta_{дин}^2 + \delta_{вп}^2}, \quad (11.25)$$

$$\delta_{АЦ} = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_{дин}^2 + \delta_{кв}^2 + \delta_{вп}^2}. \quad (11.26)$$

В целом точность измерения амплитуд цифровым анализатором повышается, так как практически исключается составляющая $\delta_{от}$.

11.4.2. Измерение параметров частотной модуляции

При частотной модуляции изменению подвергается круговая частота несущего сигнала в соответствии с законом модулирующего сигнала. В случае модуляции гармоническим сигналом модулированный по частоте сигнал записывается в следующем виде:

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos[(\omega_0 + \beta \sin \Omega t)t], \quad (11.27)$$

где U_0 — амплитуда напряжения несущей частоты f_0 ; $\omega_0 = 2\pi f_0$; $\Omega = 2\pi F$; F — частота модулирующего напряжения; $\beta = \Delta\omega/\omega = \Delta f/F$ — индекс частотной модуляции; Δf — отклонение высокочастотного сигнала от f_0 при модуляции частоты (девиация частоты).

Мгновенное значение частоты ЧМ сигнала в данном случае $f = f_0 \pm \Delta f$, а девиация частоты пропорциональна амплитуде модулирующего напряжения (U_F) и не зависит от частоты:

$$\Delta f = aU_F. \quad (11.28)$$

При использовании средств связи по назначению, т.е. в рабочих условиях, обычно измеряется девиация частоты Δf , а индекс частотной модуляции β измеряется при контрольно-поверочных и регулировочных работах.

Рассмотрим спектральный метод измерения параметров ЧМ сигналов (метод нулей функции Бесселя).

Известно, что при гармоническом законе модуляции ряд Фурье ЧМ сигнала может быть представлен в виде

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = U_m \sum_{-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \sin(\omega + k\Omega)t, \quad (11.29)$$

где $J_k(\beta)$ — функции Бесселя первого рода k -го порядка.

Из (11.29) следует, что амплитуда любой спектральной составляющей сигнала содержит информацию об индексе частотной модуляции β , т.е. этот индекс определяет распределение мощности в спектре сигнала.

Таким образом, в общем случае спектр ЧМ сигнала при модуляции однотономальным сигналом содержит большое число составляющих, частоты которых равны $f_0 + kF$ (рис. 11.9).

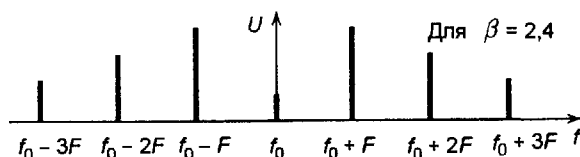


Рис. 11.9. Спектр ЧМ сигнала

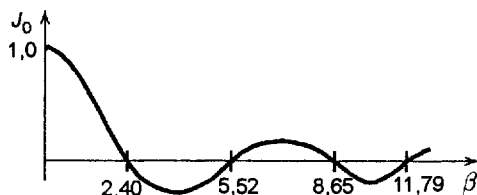


Рис. 11.10. Функция Бесселя первого рода нулевого порядка

Особый интерес представляет слагаемое в правой части формулы (11.29) при $k = 0$, т.е. напряжение несущей частоты

$$U = U_m J_0(\beta) \sin \omega_0 t, \quad (11.30)$$

где $J_0(\beta)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка аргумента, равного индексу частотной модуляции β .

Амплитуда напряжения (11.30) изменяется по закону изменения функции Бесселя (рис. 11.10).

При равенстве индекса модуляции β корням бesselевой функции амплитуда сигнала несущей частоты обращается в нуль, т.е. исчезает из спектра ЧМ сигнала (см. рис. 11.9). Значения β , являющиеся корнями функции $J_0(\beta)$, образуют возрастающую последовательность чисел (2,40; 5,52; 8,65; 11,79; 14,93,...).

На основе использования рассмотренного явления ($U_0 J_0(\beta) = 0$) разработан метод измерения девиации частоты (индекса модуляции), получивший название метода исчезающей несущей (нулей функции Бесселя). Суть этого метода заключается в регистрации по шкале анализатора спектра момента обращения в нуль спектральной составляющей.

Заметим, что в отличие от девиации частоты, которая зависит только от амплитуды U_F модулирующего сигнала, индекс модуляции β зависит еще и от частоты модулирующего сигнала:

$$\beta = \frac{\Delta f}{F} = \frac{a U_F}{F}. \quad (11.31)$$

Из формулы (11.31) видно, что метод исчезающей несущей может быть реализован как за счет изменения U_F при $F = \text{const}$, так и за счет изменения F при $U_F = \text{const}$. Наибольшее распространение получил способ, когда при плавном изменении амплитуды U_F поддерживается постоянным значение частоты модулирующего напряжения.

Схема, реализующая метод измерения индекса частотной модуляции методом исчезающей несущей, показана на рис. 11.11. В схему входят исследуемый генератор частотно-модулированного сигнала; генератор модулирующего сигнала, частоту которого можно измерять с помощью частотомера; анализатор спектра, фиксирующий моменты обращения в нуль спектральной составляющей; собственно измеритель девиации.

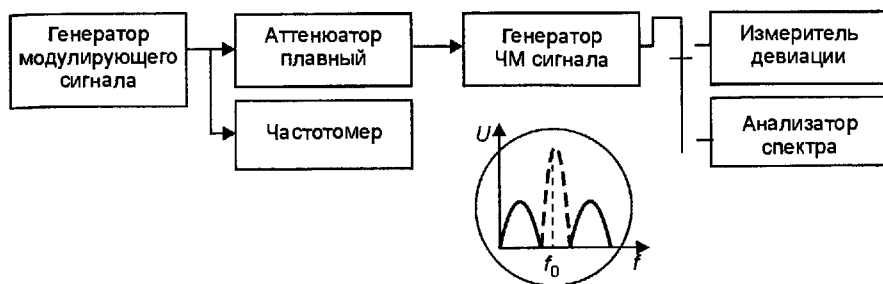


Рис. 11.11. Структурная схема измерителя индекса частотной модуляции

Увеличивая амплитуду модулирующего сигнала, можно определить момент исчезновения несущей. Этому моменту соответствует первый корень Бесселевой функции, равный 2,4, следовательно, $\beta_1 = \Delta f / F = 2,4$, а девиация частоты $\Delta f_1 = \beta_1 F = 2,4 F$. Например, при $F = 3$ кГц $\Delta f = 7,2$ кГц.

Изменяя U_F , можно построить модуляционную характеристику $\Delta f = f(U_F)$ исследуемого источника ЧМ сигнала.

Заметим, что вместо анализатора спектра можно использовать высококачественный узкополосный радиоприемник соответствующего диапазона, настраиваемый на несущую частоту f_0 . При этом полоса пропускания приемника должна быть меньше удвоенного значения самой низкой модулирующей частоты F .

Рассмотренный метод является высокоточным. Погрешность измерения составляет обычно менее 0,2 % и определяется в основном точностью регистрации момента обращения в нуль амплитуды спектральной составляющей.

К недостатку метода можно отнести большую трудоемкость и ограниченность по диапазону измеряемых значений девиации частоты ($\beta = 2,45 \dots 20$), что объясняется сложностью регистрации обращения в нуль спектральной составляющей сигнала при больших индексах модуляции.

11.4.3. Измерение нелинейных искажений

При прохождении гармонического сигнала через нелинейные элементы (у которых ток не пропорционален приложенному напряжению) форма сигнала изменяется. Искажения сигнала такого характера называются нелинейными искажениями.

Искаженный гармонический сигнал содержит в своем спектре постоянную составляющую, первую гармонику с частотой f_1 и высшие гармоники с частотами $2f_1, 3f_1, \dots$

Количественная оценка отличия реального сигнала от синусоидальной формы, т.е. оценка нелинейных искажений проводится через коэффициент гармоник, который равен отношению среднеквадратического напряжения гармоник сигнала (кроме первой) к среднеквадратическому

значению напряжения первой гармоники:

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} = \frac{U_r}{U_1}. \quad (11.32)$$

Нелинейные искажения сигнала любой формы принято оценивать коэффициентом нелинейности, равным отношению среднеквадратического значения высших гармоник к среднеквадратическому значению напряжения всех гармоник, т.е. к напряжению сигнала:

$$K_n = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}} = \frac{U_r}{U_c}. \quad (11.33)$$

Коэффициенты K_r и K_n связаны между собой следующим соотношением:

$$K_r = \frac{K_n}{\sqrt{1 - K_n^2}}. \quad (11.34)$$

Заметим, что при $K_n \leq 10\%$ выражения (11.32) и (11.33) дают практически одинаковые результаты.

Существуют два метода измерения нелинейных искажений сигнала: аналитический (спектральный) и интегральный (квазигармонический), основанные на формулах (11.32) и (11.33) соответственно.

Аналитический (гармонический) метод, реализующий формулу (11.32), основан на применении селективных приборов (анализаторов спектра, селективных вольтметров и др.), с помощью которых измеряют абсолютные или относительные значения амплитуд первой и высших гармоник, а затем по формуле (11.32) вычисляется K_r . Аналитический метод трудоемок и применяется обычно с целью выяснения роли каждой гармоники в отдельности.

Интегральный метод, реализующий формулу (11.33), позволяет оценить влияние всех высших гармоник на форму сигнала без определения их значений в отдельности. Для этого можно или подавлять первую гармонику, или выделять ее. Наибольшее распространение получил интегральный метод, основанный на подавлении первой гармоники.

Приборы, предназначенные для измерения коэффициента нелинейных искажений в соответствии с принятой системой классификации радиоизмерительных приборов, относят к виду Сб.

Схема измерителя нелинейных искажений, работающая по интегральному методу с подавлением первой гармоники, представлена на рис. 11.12. Входное устройство обеспечивает согласование входного сопротивления прибора с выходным сопротивлением исследуемого объекта. Широкополосный усилитель служит для усиления всего сигнала до величины, удобной для отсчета (максимальное показание индикатора по шкале 1 или 100 %). Перестраиваемый заграждающий фильтр служит для подавления напряжения основной частоты.

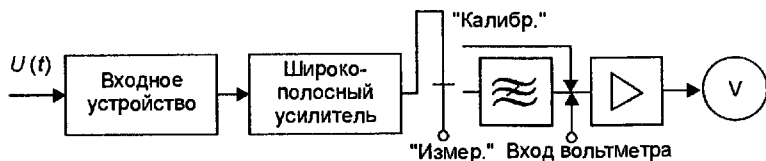


Рис. 11.12. Структурная схема измерителя нелинейных искажений

Процесс измерения нелинейных искажений сводится к выполнению двух операций. При переводе ключа рода работы в положение «Калибр» электронный вольтметр прибора измеряет напряжение всего исследуемого сигнала. При этом обычно добиваются показания вольтметра на отметке 100 % с помощью регуляторов во входном устройстве и усилителе. При переводе ключа в положение «Измер.» в схему подключается заграждающий фильтр, который препятствует прохождению первой гармоники сигнала и пропускает на вход вольтметра напряжение высших гармоник исследуемого сигнала. При соответствующей калибровке вольтметра результат измерения нелинейных искажений можно отсчитывать непосредственно по его шкале.

В измерителях нелинейных искажений обычно предусматривается дополнительный режим работы для измерения переменного напряжения синусоидальной и несинусоидальной форм, при этом используется только вольтметр.

Кроме рассмотренных в данном разделе параметров спектра сигналов, с использованием анализаторов спектра можно измерять частоты и амплитуды линейчатых спектров, спектры шумов и смешанных сигналов, АЧХ трактов передачи сигналов и АЧХ четырехполюсников в СВЧ диапазоне и другие параметры.

Контрольные вопросы и задания

1. Когда используется спектральный анализ сигналов?
2. Как записывается обобщенный ряд Фурье и какие задачи решаются на его основе?
3. Запишите прямое и обратное преобразование Фурье для сложного сигнала. Чем этот ряд отличается от ряда Фурье периодического сигнала?
4. В чем особенность дискретного преобразования Фурье?
5. Как реализуется быстрое преобразование Фурье?
6. Изобразите структурную схему анализатора спектра параллельного типа.
7. Как определяется разрешающая способность анализатора спектра?
8. Сравните анализаторы спектра последовательного действия с перестраиваемым фильтром и гетеродинного. Каковы достоинства гетеродинного анализатора?
9. Связаны ли между собой время анализа и полоса пропускания анализатора?
10. Каковы достоинства и недостатки цифровых анализаторов спектра по сравнению с аналоговыми?
11. Поясните алгоритм измерения коэффициента амплитудной модуляции с использованием анализатора спектра.
12. Какова связь функции Бесселя и спектра ЧМ сигналов?
13. Чем отличается коэффициент гармоник от коэффициента нелинейных искажений?

Г л а в а 12

Измерение уровней передачи, рабочего затухания и рабочего усиления

12.1. Уровни передачи и их измерения

В технике связи принято оценивать мощности, напряжения и токи сигналов не только их абсолютными значениями в ваттах, вольтах и амперах, но и в относительных логарифмических единицах — уровнях мощности, напряжения и тока. При использовании логарифмических единиц упрощаются арифметические расчеты: действия умножения и деления заменяются сложением и вычитанием, а порядок логарифмических величин, с которыми приходится оперировать, оказывается более низким, чем при использовании абсолютных величин.

Различают абсолютные и относительные уровни передачи.

Абсолютные уровни используются для оценки абсолютных величин мощности (p_m), напряжения (p_n) и тока (p_t) и определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} p_m &= 10 \lg \frac{P \text{ (мВт)}}{1}, \text{ дБ;} \\ p_n &= 20 \lg \frac{U \text{ (мВ)}}{775}, \text{ дБ;} \\ p_t &= 20 \lg \frac{I \text{ (мА)}}{1,29}, \text{ дБ,} \end{aligned} \quad (12.1)$$

где P , U , I — мощность, напряжение и ток, измеренные в конкретных точках цепи; 1 мВт, 775 мВ; 1,29 мА — мощность, напряжение и ток, принятые за единичные. Указанные мощности, напряжения и токи получаются на согласованной нагрузке так называемого нормального генератора.

Нормальным генератором называется генератор, имеющий внутреннее сопротивление $R_r = 600 \text{ Ом}$ и ЭДС = 1,55 В ($2 \times 775 \text{ мВ}$) ($f = 800 \text{ Гц}$) (рис. 12.1).

По известным абсолютным уровням легко найти соответствующие мощности, напряжение и ток:

$$\begin{aligned} P &= 1 \cdot 10^{p_m(\text{дБ})/10}, \text{ мВт;} \\ U &= 775 \cdot 10^{p_n(\text{дБ})/20}, \text{ мВ;} \end{aligned} \quad (12.2)$$

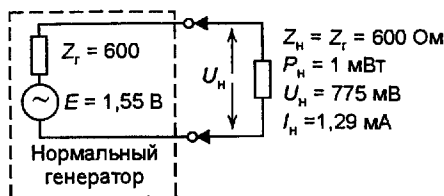


Рис. 12.1. Эквивалентная схема нормального генератора

$$I = 1,29 \cdot 10^{p_{\tau(\text{дБ})}/20}, \text{ мА.}$$

Значения мощности, напряжения и тока, принятые за единичные, взаимосвязаны. Они получаются из условия, когда за нулевую отметку шкалы уровней мощности взят рекомендованный МККТТ уровень, соответствующий мощности $P_0 = 1 \text{ мВт}$, рассеиваемой на сопротивлении $R = 600 \text{ Ом}$, тогда

$$U_0 = \sqrt{P_0 R} = \sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 600} = 775 \text{ мВ};$$

$$I = \sqrt{\frac{P_0}{R}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{600}} = 1,29 \text{ мА.}$$

В настоящее время наряду с децибелом применяется другая логарифмическая единица — непер (Нп), в основу которой положен натуральный логарифм. В этом случае абсолютные уровни мощности, напряжения и тока определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} p_{\text{м}} &= \frac{1}{2} \ln \frac{P(\text{мВт})}{1}, \text{ Нп}; \\ p_{\text{н}} &= \ln \frac{U(\text{мВ})}{775}, \text{ Нп}; \\ p_{\text{т}} &= \ln \frac{I(\text{мА})}{1,29}, \text{ Нп}. \end{aligned} \quad (12.3)$$

Здесь по известным значениям абсолютных уровней в неперах также легко найти соответствующие значения мощности, напряжения и тока:

$$\begin{aligned} P &= 1 \cdot e^{2p_{\text{м}}(\text{Нп})}, \text{ мВт}; \\ U &= 775 e^{p_{\text{н}}(\text{Нп})}, \text{ мВ}; \\ I &= 1,29 e^{p_{\text{т}}(\text{Нп})}, \text{ мА}. \end{aligned} \quad (12.4)$$

Сравнивая выражения (12.2) и (12.4), можно найти соотношение между непером и децибелом:

$$1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ} \text{ и } 1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп.}$$

В технической документации на аппаратуру уровни сигналов задаются, как правило, по мощности. В то же время измерители уровней обеспечивают в большинстве случаев измерение уровня по напряжению.

Поэтому для правильной оценки уровня при его измерениях проводят пересчет результатов измерения уровня по напряжению в уровень по мощности с учетом реального значения сопротивления нагрузки R_H в точке измерения:

$$p_m = p_n + 10 \lg(600/R_H), \text{ дБ}; \quad (12.5)$$

$$p_m = p_n + \frac{1}{2} \ln(600/R_H), \text{ Нп}. \quad (12.6)$$

Покажем справедливость равенства (12.6):

$$\begin{aligned} p_m &= \frac{1}{2} \ln \frac{P}{1 \text{ мВт}} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{U^2/R_H}{775^2/600} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \ln \frac{U^2}{775^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{600}{R_H} = p_n + \frac{1}{2} \ln \frac{600}{R_H}. \end{aligned}$$

Абсолютные уровни по мощности, напряжению и току, измеренные на нагрузке 600 Ом, совпадают по величине. В других случаях, когда $R_H \neq 600$ Ом, они будут различны. Если $R_H > 600$ Ом, то $p_m < p_n$, а если $R_H < 600$ Ом, то $p_m > p_n$.

Для измерения уровней используют специальные приборы — измерители уровня (указатели уровня). Измеритель уровня (ИУ) — это чувствительный электронный вольтметр, шкала которого проградуирована, как правило, в абсолютных уровнях напряжения, соответствующих среднеквадратическому значению измеряемого сигнала. Преобразователь ИУ обычно работает в режиме линейного детектирования, поэтому, строго говоря, показания прибора справедливы только при исследовании синусоидального сигнала (градуировочный коэффициент $C \neq 1$).

Для измерения уровней сложных сигналов применяют специальные приборы с квадратичной характеристикой детектора и шкалой, соответствующей среднеквадратическому значению сигнала. Измеренная величина в данном случае соответствует среднеквадратическому значению измеряемого сигнала сложной формы (отличного от гармонического).

Особую группу составляют избирательные ИУ. С их помощью обеспечивается измерение одной из составляющих измеряемого сигнала сложной формы.

При измерении абсолютного уровня возможны три схемы включения измерителя уровня.

Если уровень измеряется на выходе четырехполюсника, имеющего реальную нагрузку (последующий четырехполюсник) (рис. 12.2, а), то, чтобы избежать шунтирования измеряемого сигнала, ИУ включают высокоомным входом.

Если при измерении нагрузка в точке измерения отсутствует, но величина ее известна (рис. 12.2, б), то в точку измерения можно подключить соответствующую нагрузку (R_H), а ИУ включить высокоомно.

Когда сопротивление нагрузки в точке измерения известно и совпадает по величине с возможным входным сопротивлением ИУ, то его

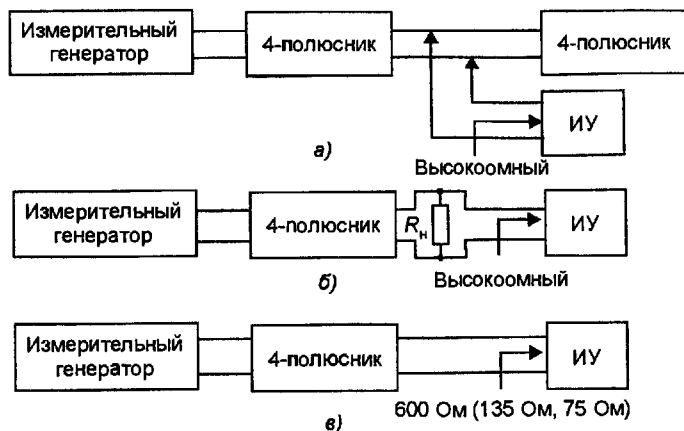


Рис. 12.2. Схемы включения измерителей уровня

вход можно подключать непосредственно в точку измерения, установив соответствующую величину $R_{вх}$ (рис. 12.2, в).

Наряду с абсолютными уровнями, описанными выше, используются относительные уровни, определенные из соотношений:

$$p_{ом} = 10 \lg(P/P_0), \text{ дБ};$$

$$p_{он} = 20 \lg(U/U_0), \text{ дБ};$$

$$p_{от} = 20 \lg(I/I_0), \text{ дБ},$$

где P , U , I — мощность, напряжение и ток в рассматриваемых точках; P_0 , U_0 , I_0 — мощность, напряжение и ток в точках, принятых за исходные (или начальные).

Из определения видно, что

$$p_m = 10 \lg(P/P_0) = 10 \lg P - 10 \lg P_0,$$

т.е. относительный уровень равен разности абсолютных уровней в данной точке и в точке, принятой за начало отсчета.

12.2. Рабочее затухание четырехполюсников и его измерение

Затухание является энергетической мерой передачи гармонического сигнала через четырехполюсник.

Рабочим затуханием называют потери энергии сигнала в пассивном четырехполюснике, оно определяется по формуле

$$a_p = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ дБ} \quad \text{или} \quad a_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}, \text{ Нп}, \quad (12.8)$$

где P_1 — полная мощность сигнала генератора, отдаваемая им в согласованную нагрузку ($Z_H = Z_r$), не зависящая от свойств четырехполюсника, а характеризующая только генератор; P_2 — полная мощность в нагрузке четырехполюсника при подключении ко входу четырехполюсника того же генератора.

По определению полная мощность

$$P = UI,$$

где U , I — среднеквадратические значения напряжения и тока соответственно.

Приведенную формулу рабочего затухания представим через абсолютные уровни передачи. Для этого мощности P_1 и P_2 выразим через напряжения U_1 и U_2 соответственно:

$$P_1 = \frac{U_1^2}{Z_r} = \frac{(E/2)^2}{Z_r}, \quad (12.9)$$

$$P_2 = \frac{U_H^2}{Z_H}. \quad (12.10)$$

тогда

$$\begin{aligned} a_p &= 10 \lg \left(\frac{E/2}{U_H} \right)^2 + 10 \lg \frac{Z_H}{Z_r} = 10 \lg \left(\frac{E}{2} \right)^2 - 10 \lg U_H^2 + 10 \lg \frac{Z_H}{Z_r} = \\ &= 20 \lg \frac{E/2}{775} - 20 \lg \frac{U_H}{775} + 10 \lg \frac{Z_H}{Z_r}, \text{ дБ.} \end{aligned} \quad (12.11)$$

Таким образом, имеем

$$a_p = p_{E/2} - p_H + 10 \lg \frac{Z_H}{Z_r}, \text{ дБ,}$$

где $p_{E/2}$ — абсолютный уровень напряжения на согласованной нагрузке генератора; p_H — абсолютный уровень напряжения на нагрузке четырехполюсника; Z_H , Z_r — модули полных сопротивлений нагрузки и генератора. Аналогично можно показать, что

$$a_p = p_{E/2} - p_H + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_H}{Z_r}, \text{ Нп.} \quad (12.12)$$

Как следует из определения рабочего затухания, для его вычисления необходимо знать Z_H и Z_r .

Если сопротивление генератора, который необходимо использовать для измерения a_p , известно, и он имеется в наличии, то схема измерения называется схемой с известным генератором.

Если требуемое сопротивление генератора известно, но его нет в наличии, то применяют схему Z , которая позволяет преобразовать генератор с любым внутренним сопротивлением в генератор с требуемым внутренним сопротивлением. С этой целью последовательно с выходом

генератора включается резистор с сопротивлением, равным требуемому внутреннему сопротивлению генератора.

Из рис. 12.3 следует, что часть схемы, лежащая влево от линии 2-2', эквивалентна источнику с внутренним сопротивлением Z и ЭДС $E_{\text{экв}}$, равной напряжению на выходе измерительного генератора (ИГ).

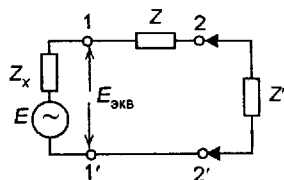


Рис. 12.3. Схема Z

Такое использование генератора допустимо, так как имеется возможность контролировать величину ЭДС эквивалентного генератора (точки 1-1') и устанавливать ее необходимую величину с помощью регулировок уровня действительного ИГ. В этом случае можно не считаться с влиянием внутреннего сопротивления действительного измерительного генератора.

На основе схемы Z можно реализовать четыре метода измерения рабочего затухания:

- 1) метод разности уровней с использованием известного генератора;
- 2) метод разности уровней с использованием схемы Z ;
- 3) метод сравнения с использованием известного генератора;
- 4) метод сравнения с использованием схемы Z .

12.2.1. Метод разности уровней с использованием известного генератора

Этот метод предусматривает два измерения:

- на выходе измерительного генератора, нагруженного согласованно (рис. 12.4, а);
- на нагрузке измеряемого четырехполюсника (рис. 12.4, б).

Рабочее затухание четырехполюсника определяется по формуле (12.11) или (12.12). Таким образом, рабочее затухание определяется как разность измеренных уровней при равенстве внутреннего сопротивления генератора и сопротивления входа четырехполюсника ($Z_r = Z_{\text{вх}}$):

$$a_p = p_{E/2} - p_n + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_n}{Z_r}.$$

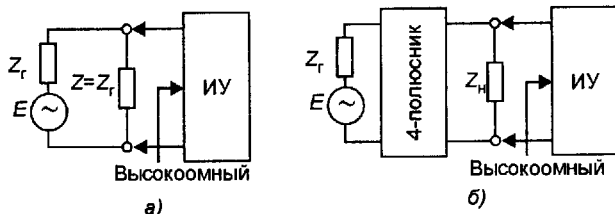


Рис. 12.4. Схема измерения методом разности уровней с использованием известного генератора

Если условие равенства сопротивлений не выполняется, то учитывается величина $0,5 \ln(Z_H/Z_r)$ или $10 \lg(Z_H/Z_r)$.

К достоинствам метода можно отнести сравнительную простоту схемы измерений и допустимость разнаса входа и выхода исследуемого четырехполюсника. В качестве недостатков — необходимость выбора генератора с требуемым внутренним сопротивлением и сравнительно низкую точность измерения, определяемую погрешностью измерителя уровня.

12.2.2. Метод разности уровней с использованием схемы Z

Рассматриваемый метод реализуется в соответствии со схемой, представленной на рис. 12.5, и предусматривает два измерения. Первое измерение проводится в точке (1–1'), где измеряется абсолютный уровень $p_{E_{\text{экв}}}$. В результате второго измерения оценивается абсолютный уровень p_H на нагрузке Z_H .

В рассматриваемой схеме точки (2–2') являются выходом эквивалентного генератора с внутренним сопротивлением Z . При этом величина Z берется равной величине выходного сопротивления четырехполюсника, предшествующего измеряемому в реальной схеме.

На основании проведенных измерений рабочее затухание определяется по формуле

$$a_p = p_{E_{\text{экв}}} - p_H + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_H}{Z} - 0,69. \quad (12.13)$$

Справедливость данного равенства становится очевидной, если учесть, что в данном случае по сравнению с методом разности уровней с использованием известного генератора при первом измерении оценивается $p_{E_{\text{экв}}}$, а не уровень на согласованной нагрузке $p_{E_{\text{экв}}/2}$.

Между этими уровнями существует однозначная связь, которая и учитывается в расчетной формуле (12.13)

$$p_{E_{\text{экв}}/2} = \ln \frac{E_{\text{экв}}/2}{775} = \ln \frac{E_{\text{экв}}}{775} - \ln 2 = p_{E_{\text{экв}}} - \ln 2 = p_{E_{\text{экв}}} - 0,69. \quad (12.14)$$

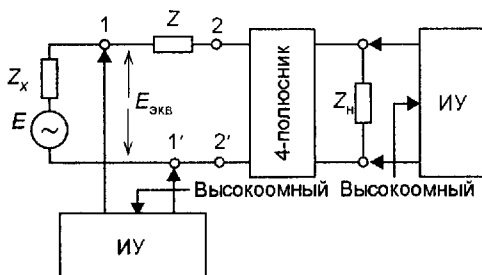


Рис. 12.5. Измерение методом разности уровней с использованием схемы Z

При использовании данного метода можно применять генератор с любым внутренним сопротивлением и исследовать четырехполюсник с разнесенными входом и выходом, однако точность измерения сравнительно низка и определяется точностью измерителя уровня.

12.2.3. Метод сравнения с использованием известного генератора

Суть метода заключается в сравнении затухания измеряемого четырехполюсника с затуханием магазина затуханий (МЗ).

Схема измерений представлена на рис. 12.6.

Условие нормальной работы схемы

$$Z_c = Z_r = Z_n,$$

где Z_c — характеристическое сопротивление магазина затуханий.

Последовательность измерения при данном методе состоит в следующем.

1. Ключи K_1 и K_2 ставят в нижнее положение и на выходе измерительного генератора устанавливают требуемый уровень сигнала при нулевом затухании магазина затуханий ($a_{мз} = 0$).
2. Ключи K_1 и K_2 устанавливают в верхнее положение и фиксируют (замечают) положение стрелки измерителя уровня (ИУ).
3. Ключи K_1 и K_2 вновь устанавливают в нижнее положение и изменением затухания МЗ добиваются такого же отклонения стрелки прибора.
4. Рабочее затухание рассчитывают по формуле

$$a_p = a_{мз}. \quad (12.15)$$

Справедливость равенства (12.15) становится очевидной, если учесть, что в верхнем положении ключа

$$a_p = p_{E/2} - p_n + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_n}{Z_r}, \quad (12.16)$$

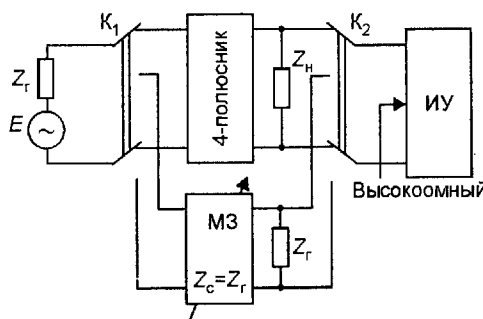


Рис. 12.6. Измерение методом сравнения с использованием известного генератора

а в нижнем положении ключа

$$a_{p, \text{мз}} = p_{E/2} - p'_H + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_H}{Z_r}. \quad (12.17)$$

При равенстве p_H и p'_H , сравнивая (12.16) и (12.17), имеем выражение (12.15).

К достоинству метода можно отнести сравнительно высокую точность, определяемую точностью отсчета МЗ, однако в данном случае требуется генератор с заданным внутренним сопротивлением, а испытывать можно только четырехполюсники, имеющие вход и выход в одном пункте, т.е. неразнесенные четырехполюсники. Кроме того, должно выполняться условие $Z_c = Z_r = Z_H$.

12.2.4. Метод сравнения с использованием схемы Z

Схема, реализующая метод сравнения с использованием схемы Z, представлена на рис. 12.7.

В схеме точки 2-2' и 3-3' являются выходами двух эквивалентных генераторов. Оба генератора имеют общую ЭДС (точки 1-1'), образуемую с помощью ИГ.

Последовательность измерения следующая.

1. Ключ К ставят в нижнее положение и при $a_{\text{мз}} = 0$ устанавливают требуемый уровень сигнала.
2. Ключ К ставят в верхнее положение и замечают положение стрелки прибора.
3. Ключ К вновь переводят в нижнее положение и изменением затухания МЗ добиваются такого же отклонения стрелки прибора.
4. Рабочее затухание рассчитывают по формуле

$$a_p = a_{\text{мз}} + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_H}{Z}. \quad (12.18)$$

Покажем справедливость равенства (12.18).

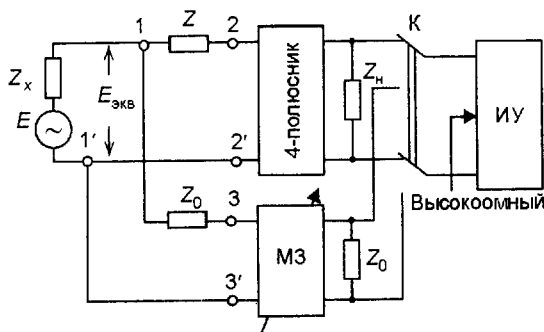


Рис. 12.7. Измерение методом сравнения с использованием схемы Z

В верхнем положении ключа

$$a_p = p_{E_{\text{вх}}} - p_n + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_n}{Z} - 0,69; \quad (12.19)$$

в нижнем положении ключа

$$a_{p.мз} = p_{E_{\text{вх}}} - p'_n + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_0}{Z_0} - 0,69. \quad (12.20)$$

При равенстве p_n и p'_n , сравнивая (12.19) и (12.20), имеем выражение (12.18).

Метод имеет сравнительно высокую точность измерения, определяемую точностью отсчета МЗ, а измерительный генератор может иметь практически любое внутреннее сопротивление.

12.3. Особенности измерения рабочего усиления четырехполюсников

Как и рабочее затухание, рабочее усиление S_p является энергетической мерой передачи сигнала через четырехполюсник:

$$S_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}, \text{ дБ}; \quad (12.21)$$

$$S_p = p_n - p_{E/2} - 10 \lg \frac{Z_n}{Z_r}, \text{ дБ}. \quad (12.22)$$

В формулах (12.21) и (12.22) P_1 , P_2 , $P_{E/2}$, Z_r , Z_n имеют такой же физический смысл, как и в формулах (12.8) и (12.11), определяющих рабочее затухание.

Измерение рабочего усиления проводится теми же методами, что и рабочего затухания. Отличие имеет место в расчетных формулах и схемах измерения.

При методе разности уровней с использованием известного генератора схема измерений представлена на рис. 12.8. Она аналогична схеме на рис. 12.4. Расчетная формула — (12.22).

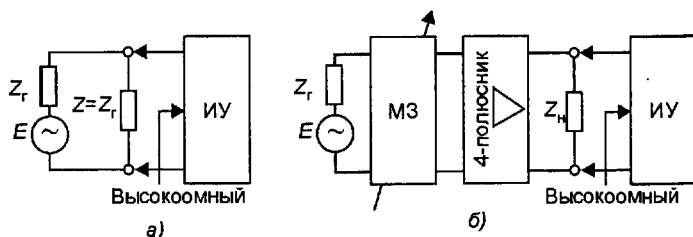


Рис. 12.8. Измерение S_p методом разности уровней с использованием известного генератора

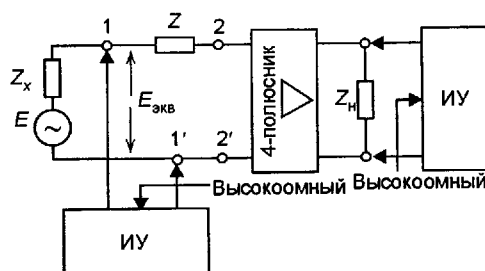


Рис. 12.9. Измерение S_p методом разности уровней с использованием схемы Z

Иногда при втором измерении между генератором и усилителем включают магазин затуханий, чтобы избежать перегрузки усилителя входным измерительным сигналом. В этом случае

$$S_p = p_n - p_{E/2} - 10 \lg \frac{Z_n}{Z_r} + a_{мз}, \text{ дБ.}$$

При методе разности уровней с использованием схемы Z схема измерений, представленная на рис. 12.9, аналогична схеме 12.5, а расчетная формула выводится аналогично формуле (12.13):

$$S_p = p_n - p_{E_{экв}} - \frac{1}{2} \ln \frac{Z_n}{Z} + 0,69, \text{ Нп.} \quad (12.23)$$

При методе сравнения с известным генератором (рис. 12.10) рабочее усиление отсчитывается по магазину затуханий:

$$S_p = a_{мз}.$$

При методе сравнения с использованием схемы Z (рис. 12.11) рабочее усиление определяется по формуле

$$S_p = a_{мз} - \frac{1}{2} \ln \frac{Z_n}{Z}, \text{ Нп,} \quad (12.24)$$

где Z — сопротивление эквивалентного генератора.

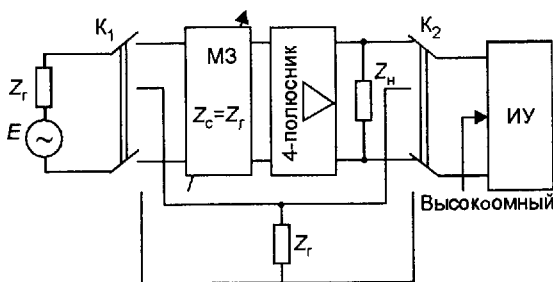


Рис. 12.10. Измерение S_p методом сравнения с использованием известного генератора

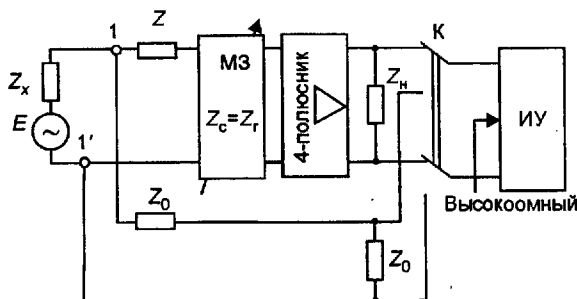


Рис. 12.11. Измерение S_p методом сравнения с использованием схемы Z

Практическое измерение a_p и S_p методом сравнения проводится с использованием специальных измерительно-коммутационных пультов (ИКП), выпускаемых промышленностью, например ИКП-300 из измерительного комплекса П-322.

Контрольные вопросы и задания

1. Чем вызвана необходимость использования логарифмических единиц измерения?
2. Что принято понимать под «нормальным» генератором?
3. Дайте определение абсолютному уровню передачи.
4. Как перейти от абсолютных уровней передачи к значениям мощности, напряжения, тока?
5. Запишите уравнение, связывающее уровень по мощности и напряжению.
6. Дайте определение рабочему затуханию.
7. Какие методы измерения рабочего затухания Вам известны?
8. Чем вызвана необходимость введения понятия «схема Z »?
9. Зарисуйте схему измерения рабочего затухания методом разности уровней с использованием известного генератора.
10. Запишите уравнения, определяющие величину рабочего затухания при использовании метода разности уровней.
11. Назовите достоинства и недостатки различных схем измерения рабочего затухания.
12. Дайте определение рабочего усиления. Чем рабочее усиление отличается от рабочего затухания?
13. Запишите расчетную формулу определения рабочего усиления при использовании метода сравнения по схеме Z .
14. В чем принципиальное различие схем измерения рабочего усиления от схем измерения рабочего затухания?

Измерение электрической мощности и шумовых параметров радиоэлектронных устройств

13.1. Общая характеристика методов измерения мощности

При оценке энергии, потребляемой электрической цепью от источника, мощность является определяющей энергетической величиной.

В цепях постоянного тока мощность, потребляемая электрической нагрузкой R (активная мощность), определяется через ток I и напряжение U :

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R, \quad (13.1)$$

В цепях переменного тока различают мгновенную, среднюю, активную, реактивную и кажущуюся мощности.

Мгновенной мощностью $P(t)$ называется произведение мгновенных значений напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$:

$$P(t) = u(t)i(t).$$

Полная (кажущаяся) мощность P_n определяется через средние квадратические значения напряжения U и тока I :

$$P_n = UI = I^2 Z_n,$$

где Z_n — полное сопротивление нагрузки.

Полная мощность определяет максимальную электрическую нагрузку электрической цепи и измеряется в вольт-амперах (В·А).

Активная (средняя за период) мощность P_a — это среднее значение мгновенной мощности $P(t)$ за период T :

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt.$$

Если ток $i(t) = I_{\max} \sin \omega t$, а напряжение $u(t) = U_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$, то

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T I_{\max} U_{\max} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt = UI \cos \varphi = I^2 R,$$

где $\cos \varphi = R/Z_n$; φ — фазовый сдвиг между напряжением и током.

Из приведенных равенств следует, что активная мощность — это мощность, поглощенная нагрузкой (полезная электрическая мощность), или это энергия, выделенная в виде тепла на сопротивлении R в единицу времени. Активная мощность измеряется в ваттах.

Реактивная мощность P_p является характеристикой энергии, которой обмениваются генератор и нагрузка в электрической цепи:

$$P_p = UI \sin \varphi = I^2 X,$$

где X — реактивное сопротивление нагрузки.

Мощность P_p измеряется в вольт-амперах реактивных (В·А_р). Она не оказывает непосредственного воздействия на нагрузку.

Полная, активная и реактивная мощности связаны между собой соотношением

$$P_{\pi} = \sqrt{P_a^2 + P_p^2}.$$

В радиотехнических устройствах и цепях, где используются сигналы импульсной формы, определяются средняя мощность за период следования импульсов T (P_{cp}) и мощность, усредненная за время импульса $\tau_{и}$ (импульсная мощность $P_{и}$):

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau_{и}} P(t) dt;$$

$$P_{и} = \frac{1}{\tau_{и}} \int_0^{\tau_{и}} P(t) dt = \frac{1}{\tau_{и}} \int_0^{\tau_{и}} u(t)i(t) dt.$$

Средняя и импульсная мощности связаны соотношением

$$P_{и} = \frac{1}{\tau_{и}} \int_0^{\tau_{и}} P(t) dt = \frac{T}{\tau_{и}} \frac{1}{T} \int_0^{\tau_{и}} P(t) dt = \frac{T}{\tau_{и}} P_{cp}.$$

Если форма импульса отличается от прямоугольной, то импульсную мощность определяют по эквивалентному прямоугольному импульсу той же площади с длительностью, равной интервалу времени на уровне половины его амплитуды. В этом случае вводится понятие пиковой мощности

$$P_{пик} = P_{и} K_{\Phi},$$

где K_{Φ} — коэффициент формы импульса, равный отношению максимального уровня импульсной мощности действительного импульса к уровню мощности эквивалентного прямоугольного импульса.

В практике электрорадиотехнических измерений реальные пределы значений измеряемой мощности лежат в частотном диапазоне от постоянного тока до десятков ГГц. Такие большие диапазоны измерений, а также различные требования к точности измерений привели к разработке большого количества методов измерения мощности.

Все известные методы измерения мощности принято разделять на две большие группы: косвенные и прямые. Косвенные методы сводятся обычно к измерению токов и напряжений с последующим расчетом мощности по приведенным выше формулам. Прямые измерения проводят с помощью приборов, предназначенных для непосредственного измерения мощности, — ваттметров.

В цепях постоянного тока и переменного тока промышленной частоты прямые измерения проводят в основном с помощью ваттметров электромеханического типа с электродинамическим измерительным механизмом, а для косвенных измерений используют приборы непосредственной оценки (амперметры, вольтметры).

В цепях переменного тока звуковых и высоких частот (ВЧ) для косвенного измерения мощности используют электронные вольтметры и термоэлектрические амперметры, частотные возможности которых соответствуют частоте измеряемого сигнала. Прямые измерения мощности проводят с помощью высокочастотных ваттметров, во входных цепях которых (приемных преобразователях) измеряемая мощность преобразуется в пропорциональную ей другую физическую величину (переменный ток, постоянный ток, ЭДС Холла и др.). Применяют также ваттметры, электронные схемы которых реализуют на квадраторах и сумматорах. На высоких частотах отдают предпочтение прямым методам.

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) используют только прямые измерения, основанные, как правило, на преобразовании энергии электромагнитных колебаний в другие виды энергии, более удобные для измерений (тепловую, механическую), с последующим вторичным преобразованием в электрический сигнал.

На СВЧ измеряют мощность, поглощаемую согласованной нагрузкой, или мощность, проходящую по коаксиальной или волноводной линии к произвольной нагрузке. В соответствии с этим различают методы измерения и ваттметры поглощаемой (вида М3) и проходящей (вида М2) мощности.

При измерении поглощаемой мощности нагрузкой источника энергии является обычно сам ваттметр, имеющий в приемном преобразователе эквивалентную согласованную нагрузку (рис. 13.1, а). При непосредственном подключении источника сигнала (генератора), имеющего внутреннее сопротивление $Z_r = R_r + jX_r$ и напряжение U_r , к нагрузке, имеющей полное сопротивление $Z_n = R_n + jX_n$, мощность, отдаваемая в нагрузку,

$$P_n = \frac{U_r^2 R_n}{(R_r + R_n)^2 + (X_r + X_n)^2}.$$

Если генератор и нагрузка полностью согласованы ($R_r = R_n$, $X_r = X_n$), то в нагрузку отдается максимальная мощность

$$P_{\max} = \frac{U_r^2}{4R_r}.$$

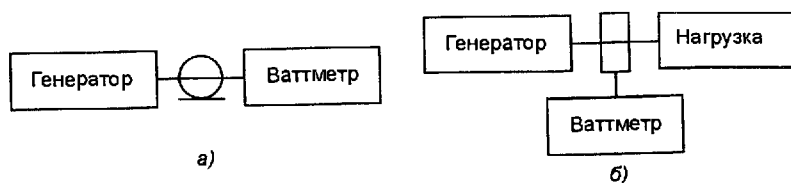


Рис. 13.1. Измерение мощности в СВЧ диапазоне: а — поглощаемой; б — проходящей

В реальных условиях не всегда можно добиться полного согласования. Тогда относительная систематическая погрешность из-за рассогласования

$$\delta_p = \frac{P_v - P_{\max}}{P_{\max}}, \quad (13.2)$$

где P_v — мощность, поглощаемая ваттметром.

Указанная погрешность может возрасти, если нагрузка подключена к генератору через линию передачи. В этом случае потери мощности возникают из-за несогласованности линии с генератором и нагрузкой. Если потерями в линии передачи пренебречь, тогда

$$P_n = P_{\max} \frac{(1 - |\Gamma_n|^2)(1 - |\Gamma_r|^2)}{|1 - \Gamma_r \Gamma_n|^2}, \quad (13.3)$$

где Γ_r — коэффициент отражения от генератора; Γ_n — коэффициент отражения от нагрузки.

С учетом (13.2) и (13.3) погрешность рассогласования определяется равенством

$$\delta_p = \frac{(1 - |\Gamma_n|^2)(1 - |\Gamma_r|^2)}{|1 - \Gamma_r \Gamma_n|^2} - 1.$$

Если генератор с линией передачи согласован, т.е. $\Gamma_r = 0$, то

$$\delta_p = -|\Gamma|^2. \quad (13.4)$$

Так как коэффициент отражения Γ связан с коэффициентом стоячей волны ($K_{ст}$) известными соотношениями:

$$\Gamma = \frac{K_{ст} - 1}{K_{ст} + 1}, \quad K_{ст} = \frac{(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)},$$

то равенство (13.4) можно записать в следующем виде:

$$\delta_p = -\frac{(K_{ст} - 1)^2}{(K_{ст} + 1)^2}.$$

Учитывая, что $K_{ст}$ обычно известен, погрешность измерения из-за рассогласования можно учесть, вводя поправку.

Ваттметры поглощаемой мощности чаще реализуют на основе теплового преобразования электромагнитной энергии калориметрическим, термоэлектрическим или терморезисторным методом.

При измерении мощности, рассеиваемой в произвольной нагрузке, измеряют проходящую мощность. По определению проходящая мощность $P_{\text{пр}}$ определяется через падающую ($P_{\text{п}}$) и отраженную ($P_{\text{о}}$) мощности следующим равенством:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{п}} - P_{\text{о}} = P_{\text{п}}(1 - |\Gamma_{\text{н}}|^2).$$

Ваттметры проходящей мощности реализуются обычно в виде встроенных приборов и позволяют измерять мощность непрерывно в процессе эксплуатации радиоэлектронных устройств.

Приемные преобразователи ваттметров проходящей мощности, включаемые в линию передачи между генератором и нагрузкой (рис. 13.1,б), не должны искажать структуру электромагнитного поля в тракте передачи.

При построении ваттметров проходящей мощности обычно используют механический (пондеромоторный) метод преобразования, метод на основе использования направленных ответвителей, метод на основе эффекта Холла.

13.2. Методы измерения мощности

13.2.1. Электромеханический метод

Данный метод является основным при измерении мощности на постоянном токе и токах промышленной частоты. Суть метода состоит в использовании для измерения мощности приборов электромеханического типа, т.е. построенных на основе электромеханических измерительных механизмов. В указанных приборах (ваттметрах) используют в основном электродинамические и ферродинамические измерительные механизмы. Принцип действия таких приборов рассмотрен в гл. 5. Здесь остановимся лишь на особенностях включения ваттметров электромеханического типа в измеряемую цепь.

В однофазных цепях включение ваттметров может осуществляться по схеме, представленной на рис. 13.2,а или б. Неподвижная катушка включается как амперметр, а подвижная как вольтметр, т.е. параллельно нагрузке. При этом систематическая методическая погрешность измерения определяется схемой включения катушек.

В схеме на рис. 13.2,а ток I_A , протекающий через неподвижную катушку с сопротивлением R_A , и ток $I_{\text{н}}$, протекающий через нагрузку $R_{\text{н}}$, равны. Измеряемое напряжение U складывается из падения напряжения на неподвижной катушке U_A и нагрузке $U_{\text{н}}$. Тогда при отсутствии сдвига фаз между током и напряжением измеряемая активная мощность

$$P = UI_{\text{н}} = U_{\text{н}}I_{\text{н}} + U_AI_{\text{н}} = P_{\text{н}} + P_A, \quad (13.5)$$

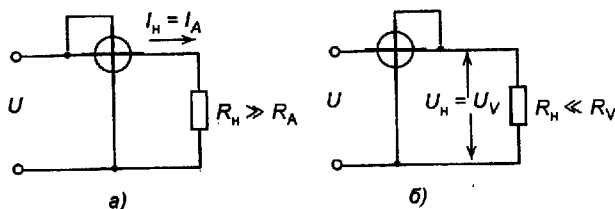


Рис. 13.2. Схемы включения электромеханических ваттметров: а — при больших R_H ; б — при малых R_H

т.е. равна мощности, потребляемой нагрузкой и неподвижной катушкой, а методическая погрешность для этой схемы

$$\delta = \frac{P_A}{P_H} \cdot 100 \% = \frac{R_A}{R_H} \cdot 100 \%$$

Рассмотренную схему целесообразно использовать при $R_A \ll R_H$. В схеме на рис. 13.2,б справедливо равенство $I_A = I_H + I_V$, тогда по аналогии с (13.5)

$$P = P_H + P_V, \quad (13.6)$$

где P_V — мощность, потребляемая обмоткой подвижной катушки. Следовательно,

$$\delta = \frac{P_V}{P_H} \cdot 100 \% = \frac{R_H}{R_V} \cdot 100 \%$$

Данную схему целесообразно использовать при $R_V > R_H$.

13.2.2. Метод амперметра и вольтметра

Косвенный метод измерения мощности с помощью двух приборов — амперметра и вольтметра — находит применение в цепях постоянного тока и переменного тока низкой частоты. Диапазон измеряемых мощностей определяется параметрами применяемых вольтметра и амперметра.

Определяемая мощность в данном случае находится через произведение измеряемого тока и напряжения. Погрешность результата измерения определяется погрешностями прямых измерений и вычисляется по правилам измерения погрешностей при косвенных измерениях.

Возможные схемы включения приборов для измерения мощности показаны на рис. 13.3, а и б. Как и при измерении мощности с помощью электродинамических ваттметров, здесь имеет место методическая погрешность, которая при известных входных сопротивлениях амперметра и вольтметра может быть снижена путем внесения в результат измерения соответствующих поправок.

Для схемы на рис. 13.3,а справедливо уравнение (13.5). Эта схема применяется для измерения мощности при больших сопротивлениях нагрузки, а для схемы на рис. 13.3,б справедливо равенство (13.6), и она применяется при малых сопротивлениях нагрузки.

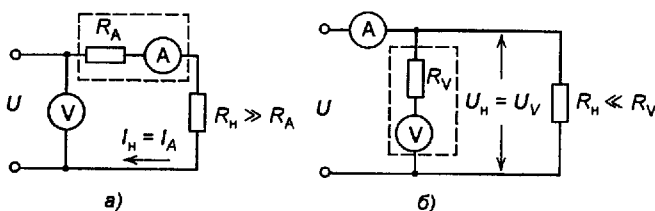


Рис. 13.3. Измерение мощности косвенным методом: а — при больших сопротивлениях нагрузки; б — при малых сопротивлениях нагрузки

При измерении мощности радиопередающих устройств, генераторов, усилителей и других источников энергии при известном сопротивлении нагрузки, может использоваться один вольтметр или один амперметр. Мощность в этом случае определяется по измеренным значениям тока или напряжения по формуле (13.1). Выбор типа амперметра или вольтметра определяется диапазоном частот, измеряемой мощностью, сопротивлением нагрузки и допустимой погрешностью измерения.

При измерении мощности на высоких частотах и нижнем участке сверхвысоких частот с использованием вольтметра применяется нагрузка коаксиальной конструкции сопротивлением 75 Ом, выполненная в виде фарфоровой трубки 1, покрытой снаружи углеродистым слоем (рис. 13.4). Нагрузка помещается в экран особой формы 2, обеспечивающий хорошее согласование входного сопротивления ваттметра с волновым сопротивлением коаксиального кабеля 3, по которому подводится измеряемая мощность.

Рассматриваемый вольтметровый ваттметр имеет амплитудный (пиковый) детектор АД, подключаемый к нагрузке через контактное (серебряное) кольцо 4, и электронный вольтметр ЭВ, показания которого пропорциональны мощности, рассеиваемой на нагрузочном резисторе 1:

$$P_x = \frac{K_1 K_2 U_m^2}{2R_1},$$

где K_1 — частотный коэффициент; $K_2 = (R_1 + R_2)/R_1$ — коэффициент деления напряжения в нагрузочном резисторе.

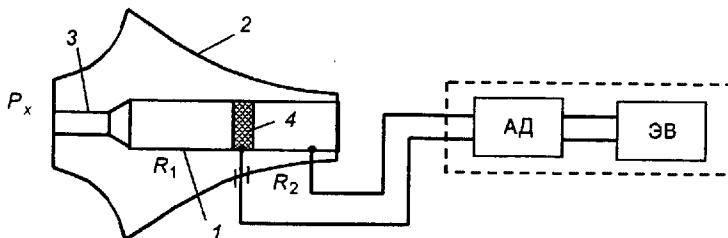


Рис. 13.4. Вольтметровый ваттметр

Частотный и динамический диапазоны таких ваттметров определяются в основном характеристиками используемых диодов. К числу рассматриваемых ваттметров относят приборы типа МЗ-3А, МЗ-5А, МЗ-9, обеспечивающие измерение средней и импульсной мощностей. Так, прибор МЗ-3А работает в диапазоне 30 МГц...1,2 ГГц с погрешностью до 15 % и пределами измеряемой средней мощности от 0,25 до 15 Вт и импульсной мощности от 5 Вт до 5 кВт.

13.2.3. Метод перемножения

Данный метод предполагает реализацию операции перемножения напряжения и тока нагрузки по формуле (13.7) и тем самым определяет активную мощность.

Процедура перемножения строится на основе тождества

$$x_1 x_2 \equiv \frac{1}{4}[(x_1 + x_2)^2 - (x_1 - x_2)^2], \quad (13.7)$$

позволяющего перейти от операции умножения к совокупности двух операций — возведения в квадрат и суммирования, которые реализуют на квадраторах (устройствах с квадратичной характеристикой) и сумматорах (рис. 13.5).

Если $x_1 = U_m \sin \omega t$, а $x_2 = I_m R \sin(\omega t - \varphi)$, то напряжение на входе фильтра схемы

$$4x_1 x_2 = 2U_m I_m \cos \varphi - 2U_m I_m \cos(2\omega t - \varphi). \quad (13.8)$$

После фильтра нижних частот, не пропускающего переменную составляющую (второе слагаемое (13.8)), показания магнитоэлектрического прибора будут пропорциональны измеряемой мощности, т.е. первому члену (13.8):

$$P = 0,5 U_m I_m \cos \varphi = UI \cos \varphi.$$

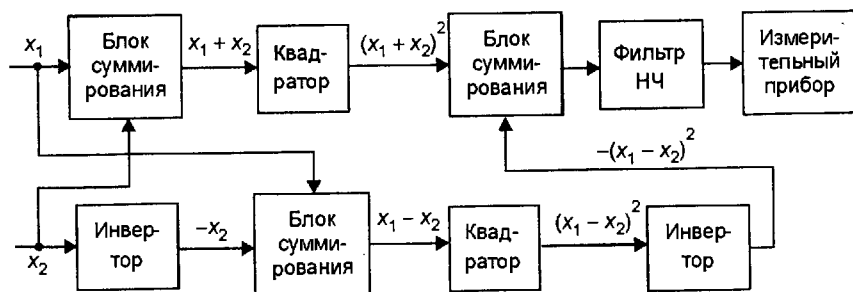


Рис. 13.5. Структурная схема квадраторного ваттметра

13.2.4. Калориметрический метод

Калориметрический метод измерения мощности основан на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую с последующим измерением приращения температуры рабочего тела калориметра, поглотившего эту энергию.

Основными элементами калориметрического ваттметра являются приемный преобразователь, в котором расположена нагрузка, поглощающая электромагнитную энергию и выделяющая тепло; рабочее (нагреваемое) тело, в качестве которого используется дистиллированная вода или растворы на ее основе, а также твердые объемные или пленочные поглотители (диэлектрики с большими потерями, металлические пленки с большим сопротивлением); измерительный узел, обеспечивающий измерение температуры рабочего тела и по ее значению определяющий величину измеряемой мощности.

Известно, что термодинамическое состояние калориметрической нагрузки массой m , равномерно нагретой до температуры T , описывается выражением [14]

$$P_n = cm \frac{dT}{dt} + H(T - T_{cp}), \quad (13.9)$$

где P_n — рассеиваемая в нагрузке мощность; c — удельная теплоемкость нагрузки; H — коэффициент теплоотдачи; T_{cp} — температура окружающей среды.

Первое слагаемое определяет приращение температуры калориметрической нагрузки под действием рассеиваемой в ней мощности, а второе — рассеяние тепла, обусловленное теплопроводностью, излучением и конвекцией.

В зависимости от соотношения первого и второго слагаемых в выражении (13.9) различают калориметрические ваттметры, работающие в статическом (адиабатном) режиме без теплоотдачи во внешнюю среду, и циркуляционные (проточные). В статическом калориметре нагреваемое тело (чаще вода) неподвижно, а в проточном оно находится в постоянном движении.

Основными узлами статического калориметрического ваттметра с сухим рабочим телом и коаксиальной согласованной нагрузкой (рис. 13.6) являются поглощающая нагрузка (резистор), теплопроводящая насадка, термопара и тепловой экран.

Измеряемая мощность в нагрузке таких ваттметров преобразуется в теплоту, нагревающую рабочее тело, температура которого измеряется с помощью термопары. Если обеспечивается надежная теплоизоляция рабочего тела от окружающей среды, выражение (13.9) можно записать в виде

$$P_n = cm \frac{dT}{dt}.$$

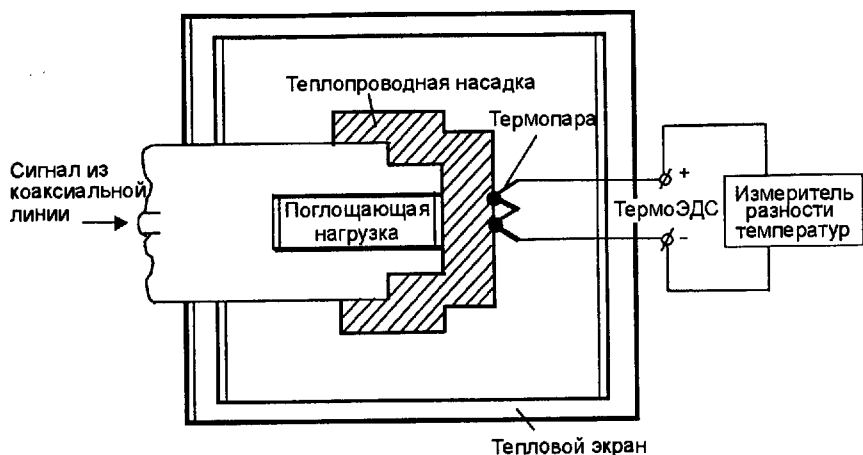


Рис. 13.6. Коаксиальная согласованная нагрузка

С учетом коэффициента перевода калорий в джоули измеряемая мощность в ваттах определяется равенством

$$P_n = cm \frac{(T_2 - T_1)}{0,24 \Delta t} = 4,17 cm \frac{\Delta T}{\Delta t} = k cm \frac{\Delta T}{\Delta t},$$

где c — удельная теплоемкость, кал/(г·град); m — масса калориметрического рабочего тела, г; ΔT — приращение температуры за время Δt , с; 0,24 — тепловой эквивалент работы, кал/Дж; k — коэффициент пропорциональности измерителя разности температур.

Для получения высокой точности измерений необходимо обеспечить надежную теплоизоляцию рабочего тела, а также хорошее согласование нагрузки с генератором и линией передачи.

Достоинство статических калориметрических ваттметров — простота измерений, а недостаток — необходимость в периодическом отключении прибора для охлаждения.

Широкое распространение получили *проточные калориметрические ваттметры*, в которых рабочее тело (жидкость) циркулирует в системе с постоянной скоростью, а его температура в установившемся режиме не меняется, т.е. $dT/dt = 0$, и выражение (13.9) принимает вид

$$P_n = H(T - T_{cp}),$$

или с учетом коэффициента перевода калорий в джоули [14]

$$P_n = c \frac{G \rho \Delta T}{0,24} = 4,17 c G \rho \Delta T,$$

где G — расход жидкости, см³/с; ρ — плотность, г/см³; ΔT — приращение температуры.

Таким образом, проточные калориметрические ваттметры не ну-

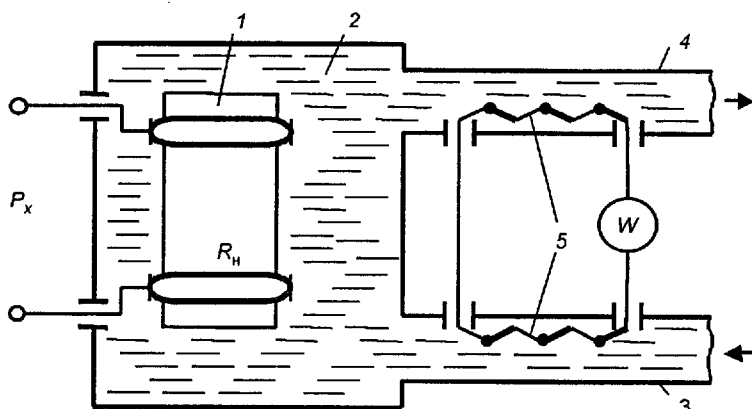


Рис. 13.7. Проточный калориметрический ваттметр

ждаются в периодическом отключении для охлаждения, что относится к их достоинствам.

Основные элементы таких ваттметров (рис. 13.7): поглощающая нагрузка R_n 1; рабочее тело (жидкость) 2; входной 3 и выходной 4 патрубки; батареи терморезисторов 5.

Приращение температуры ΔT измеряется с помощью батареи терморезисторов, расположенных до и после нагрузки. Если терморезисторы включить последовательно и встречно, то при постоянной скорости циркуляции жидкости (при постоянстве расхода жидкости) показание прибора, градуированного в единицах мощности, будет пропорционально ΔT .

Основной недостаток проточных калориметрических ваттметров рассмотренной конструкции, т.е. работающих по методу прямого преобразования, состоит в необходимости постоянства расхода жидкости, что технологически осуществить сложно.

Указанный недостаток устраняется в проточных калориметрических ваттметрах, построенных по методу сравнения теплового эффекта, вызванного энергией измеряемого источника (например, ВЧ) с тепловым эффектом, вызванным энергией постоянного тока или тока низкой частоты.

Основными достоинствами калориметрических ваттметров являются широкие пределы измеряемых мощностей ($10^{-2} \dots 10^4$ Вт); широкий диапазон частот (0,001...40 ГГц); высокая точность измерений (пределы допускаемой погрешности 0,5...10 %) [28]. Недостатками этих ваттметров являются большое время установления показаний (до единиц минут), большие габаритные размеры и масса прибора (у проточных).

13.2.5. Метод терморезистора

Принцип терморезисторного измерения мощности основан на свойствах терморезисторов изменять собственное сопротивление при нагреве под воздействием ВЧ или СВЧ энергии.

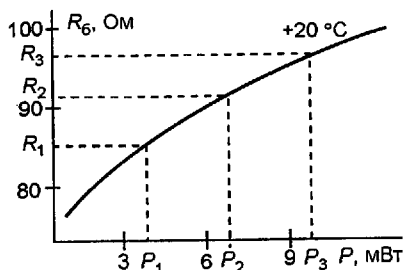


Рис. 13.8. Типовая зависимость сопротивления болометра от рассеиваемой в нем мощности

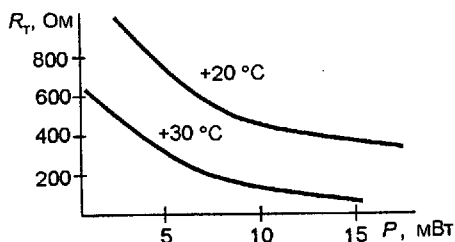


Рис. 13.9. Типовая зависимость сопротивления термистора от рассеиваемой в нем мощности

В зависимости от вида терморезистора различают болометрические и термисторные ваттметры.

Болометр представляет собой стеклянный вакуумный или заполненный инертным газом баллон, в который впаяна платиновая или вольфрамовая нить. Применяют также пленочные болометры, состоящие из платиновой или палладиевой пленки, нанесенной в вакууме на подложку из стекла или слюды. Примерная зависимость сопротивления болометра от рассеиваемой в нем мощности и температуры окружающей среды показана на рис. 13.8.

Терморезисторы изготавливают из полупроводниковой смеси окиси марганца, никеля и кобальта в форме бусинок или цилиндров, помещенных в стеклянный баллон с двумя выводами. Типичная зависимость сопротивления термистора от рассеиваемой в нем мощности и температуры окружающей среды показана на рис. 13.9.

Из сравнения характеристик болометров и термисторов следует, что термисторы имеют отрицательный температурный коэффициент, более высокую чувствительность, чем болометры, и большую устойчивость к перегрузкам.

Терморезисторный ваттметр состоит из следующих основных элементов: преобразователя, в котором размещены терморезистор и элементы согласования; измерительной схемы для измерения сопротивления терморезистора и термостабилизации; отсчетного устройства с цифровой или стрелочной индикацией; источника питания.

Терморезисторные преобразователи (головки, камеры) служат для размещения и согласования терморезисторов с линией передачи и конструируются на основе отрезков коаксиальных или волноводных линий.

В коаксиальном преобразователе (рис. 13.10) терморезистор или болометр 1 включается в разрыв центрального провода 2. Терморезистор находится в цепи тракта СВЧ и одновременно в цепи постоянного тока. Для развязки этих цепей (для включения в измерительную цепь) предусмотрен высокочастотный дроссель 3 и конструктивный конденсатор 4, образованный внешним проводником коаксиальной линии и короткозамкнутым отрезком.

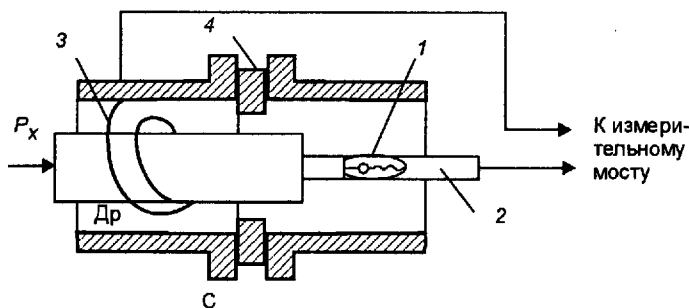


Рис. 13.10. Термисторный коаксиальный преобразователь

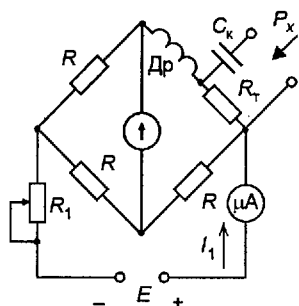


Рис. 13.11. Схема моста с терморезистором

Измерительные схемы строят на основе неуравновешенных или уравновешенных мостов постоянного или переменного тока.

Упрощенная уравновешенная схема моста постоянного тока показана на рис. 13.11 [14]. В этой схеме измерение проводят в два этапа. Сначала (до подачи сигнала) мост приводят в равновесие на постоянном токе изменением сопротивления резистора R_1 и замечают значение постоянного тока I_1 . Так как через терморезистор протекает половина питающего мост тока, мощность, рассеиваемая терморезистором R_T ,

$$P_1 = (I_1/2)^2 / R_T = I_1^2 R_T / 4 = I_1^2 R / 4,$$

где $R = R_T$ при балансе моста.

На втором этапе подают СВЧ сигнал, терморезистор дополнительно нагревается, его сопротивление изменяется (уменьшается), и мост выходит из равновесия.

Для восстановления равновесия моста резистором R_1 уменьшают постоянный ток через терморезистор и фиксируют второе показание амперметра I_2 . Мощность постоянного тока, рассеиваемая на терморезисторе,

$$P_2 = I_2^2 R / 4.$$

Так как уменьшение мощности постоянного тока равно приложенной СВЧ мощности, можно записать

$$P_x = P_1 - P_2 = (I_1^2 - I_2^2) R / 4.$$

Измерение мощности рассмотренным методом требует двух операций уравновешивания моста и является косвенным, так как требует вычислений.

Необходимость вычислений отпадает в прямопоказывающих ваттметрах с уравновешенным мостом, в которых измеряется разность токов $\Delta I = I_1 - I_2$.

В целом терморезисторные ваттметры нашли широкое распространение в качестве поглощающих ваттметров вида МЗ (МЗ-28, МЗ-21А, МЗ-22, МЗ-10А, МЗ-51, МЗ-52, МЗ-53).

13.2.6. Термоэлектрический метод

Сущность термоэлектрического метода измерения мощности заключается в преобразовании электрической энергии в тепловую с помощью термопреобразователей (термопар) с последующим измерением термоЭДС, возникающей в результате нагрева.

Получили распространение термопреобразователи с прямым и косвенным нагревом. В термопреобразователе с прямым подогревом высокочастотный ток проходит через термопару, а в преобразователе с косвенным нагревом электромагнитная энергия нагревает резистивную пленку или проволоку, и термопара реагирует на разность температур.

В ваттметрах, работающих по термоэлектрическому методу, термопреобразователи являются основными элементами, определяющими метрологические характеристики приборов. Они определяют диапазон рабочих частот, диапазон уровней измеряемых мощностей, чувствительность, время установления показаний.

Термопреобразователи исполняются в виде вставок (головок), размещаемых в коаксиальных или волноводных трактах. Конструкции термоэлектрических вставок различны. Один из вариантов их конструктивного исполнения показан на рис. 13.12 [28].

Термоэлектрическая вставка состоит из следующих активных элементов: слюдяного диска 1; электродов 2 для подключения к линии СВЧ; термопар 3. Термопары выполняют из двух тонких пластинок (висмут-сурьма, копель-сурьма, хромель-копель), распыленных на диэлектрическую подложку.

ТермоЭДС на выходе преобразователя измеряют вольтметром постоянного тока. При этом измеряемая мощность СВЧ сигнала P_x , мВт, связана с напряжением термоЭДС U_t , мВ, на выходе термопары через коэффициент преобразования термопреобразователя $K_{пр}$, мВ/мВт:

$$P_x = U_t / K_{пр}.$$

Получили распространение аналоговые (МЗ-21, МЗ-21А) и цифровые (МЗ-51е, МЗ-53) термоэлектрические ваттметры.

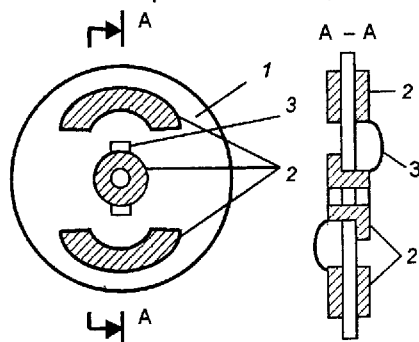


Рис. 13.12. Термоэлектрическая вставка

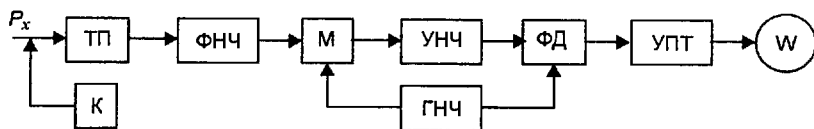


Рис. 13.13. Структурная схема аналогового термоэлектрического ваттметра

В схеме аналогового ваттметра (МЗ-21) термоЭДС с выхода термопреобразователя ТП подается через фильтр нижних частот ФНЧ на интегральный преобразователь (модулятор), формирующий из постоянного пульсирующее напряжение. После усиления усилителем низкой частоты УНЧ и выпрямления фазовым детектором ФД сигнал усиливается усилителем постоянного тока УПТ, а затем подается на стрелочный прибор, проградуированный в единицах мощности (рис. 13.13).

Схемой предусмотрена калибровка прибора с помощью калибратора К, вырабатывающего калибровочный сигнал (меандр с частотой 20...50 Гц). С помощью опорного генератора низкой частоты ГНЧ осуществляется синхронизация интегрального преобразователя и фазового детектора.

Основные достоинства термоэлектрических ваттметров: широкий диапазон частот (0...37,5 ГГц), большие пределы измеряемых мощностей (10^{-6} ... 10^2 Вт), малое время установления показаний, высокая чувствительность, малая зависимость результата измерения от температуры окружающей среды.

13.2.7. Метод измерения проходящей мощности на основе использования направленных ответвителей

Данный метод реализуется с помощью направленных ответвителей в сочетании с ваттметрами поглощающей мощности.

Направленный ответвитель — это высокочастотный прибор, обеспечивающий ответвление определенной части мощности падающей или отраженной волны. Конструктивно он состоит (рис. 13.14) из главной 1 и вспомогательной линий 2, электрически связанных между собой с помощью элементов связи (отверстий) 3, расположенных на расстоянии четверти длины волны ($\lambda_B/4$). Вспомогательная линия нагружается на сопротивление, равное ее волновому сопротивлению.

В теории СВЧ доказывается, что если по главной линии распространяется падающая волна (P_n) к нагрузке и отраженная (P_o) — от нагрузки к генератору, то к выходу вспомогательной линии ответвителя поступает часть мощности (ΔP_n) только падающей волны.

Если ответвитель развернуть на 180° , оставив на своих местах генератор и нагрузку, то ответвляться будет часть мощности (ΔP_o) только отраженной волны.

Схема измерения проходящей мощности с использованием двух ответвителей, имеющих одинаковые характеристики и включенных последовательно и встречно в линию передачи, показана на рис. 13.15.

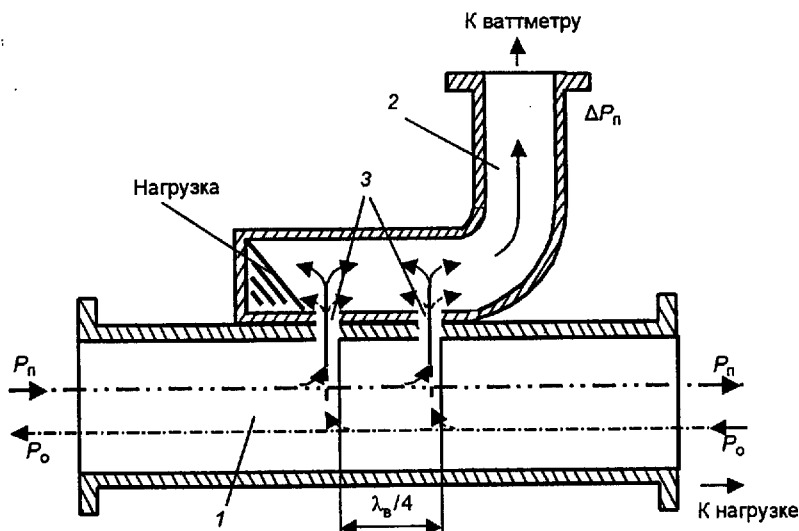


Рис. 13.14. Направленный ответвитель

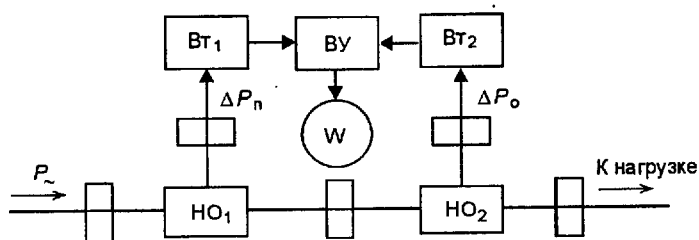


Рис. 13.15. Структурная схема измерения проходящей мощности с использованием направленных ответвителей

Выделение направленными ответвителями НО части мощности падающей и отраженной волн измеряются поглощающими ваттметрами (ВТ₁ и ВТ₂). Результаты измерений поступают на вычитающее устройство ВУ, на выходе которого включен измеритель, градуированный в единицах мощности. Его показания соответствуют проходящей мощности, определяемой как разность частей мощности падающей и отраженной волн.

Измерители мощности на основе направленных ответвителей имеют широкий диапазон измерений ($10^{-4} \dots 10^5$ Вт) и обеспечивают пределы допускаемых погрешностей (5...15 %).

13.2.8. Пондеромоторный метод измерения проходящей мощности

Метод основан на известном явлении преобразования энергии электромагнитного поля в механическую.

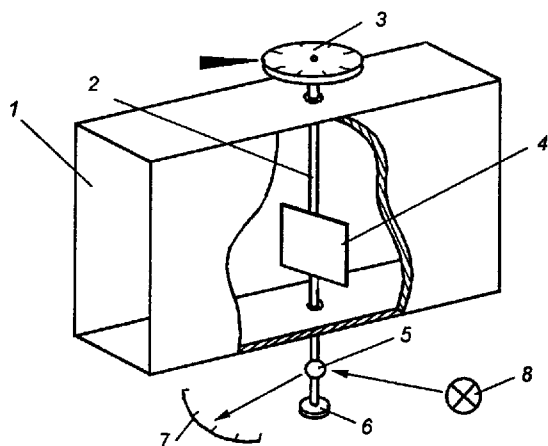


Рис. 13.16. Пондеромоторный ваттметр

Наибольшее распространение получил метод оценки пондеромоторного (механического) действия электромагнитной волны на помещенную в волновод отражающую пластинку. Такой прибор называют ваттметром крутильного типа. Рассмотрим принцип его действия, используя рис. 13.16 [28].

Основные конструктивные элементы прибора: отрезок прямоугольного волновода 1, упругий стержень 2, крутильная головка 3, металлическая пластина 4, зеркало 5, амортизатор 6, шкала 7, источник света 8.

Работа прибора основана на измерении вращающего механического момента, испытываемого помещенной в волновод металлической пластиной, при распространении по волноводу СВЧ сигнала.

При отсутствии сигнала СВЧ пластина располагается под некоторым начальным углом к оси волновода, соответствующим нулевой отметке шкалы. При распространении по волноводу волны типа H_{01} пластина образует диполь с электрическим моментом $P = el$, где e — точечный заряд, а l — длина диполя. Возникающая при этом пара сил создает крутящий момент M , поворачивающий пластину 4 на угол θ , пропорциональный измеряемой мощности сигнала:

$$M = PE \sin \theta,$$

где E — напряженность электрического поля. Угол θ фиксируется с помощью светового отображения на шкале 7.

Известен также пондеромоторный ваттметр, выполненный путем удаления узкой стенки волновода и замены ее упругой пластиной, связанной с датчиком механического давления, который вырабатывает сигнал, пропорциональный уровню проходящей мощности.

Пондеромоторные ваттметры применяются для измерения средних уровней мощности с погрешностью 1...2 %. Их недостатками являются

высокая чувствительность к вибрациям; сложность механической конструкции; зависимость показаний от частоты, что вызывает необходимость использовать графики частотных поправок.

13.2.9. Метод, основанный на эффекте Холла

Если через полупроводниковую пластину в продольном направлении пропустить электрический ток и поместить ее в магнитное поле так, чтобы силовые линии поля были перпендикулярны направлению тока, то на поперечных гранях пластины возникает ЭДС e_x . Описанный процесс возникновения e_x называют эффектом Холла (рис. 13.17).

В качестве материалов для датчиков Холла (полупроводниковых пластин) используют кристаллы германия, кремния, сплавов индия.

Величина e_x определяется следующим равенством:

$$e_x = K_x IB,$$

где K_x — коэффициент пропорциональности; I — ток в пластине; B — магнитная индукция.

В ваттметрах, работающих на основе описанного эффекта, датчик Холла помещают в центре волновода.

Если датчик ориентирован в электрическом поле так, что ток возникает за счет поперечной составляющей электрического поля E , а плотность потока B — за счет поперечной составляющей магнитного поля H , то напряжение Холла пропорционально среднему значению плотности мощности $P_x = EH$. Последовательно с датчиком Холла включается измерительный прибор, показания которого будут пропорциональны ЭДС Холла, а следовательно, и средней мощности сигнала, проходящего по волноводу.

Достоинствами ваттметров с датчиками Холла являются малое потребление мощности, надежность и малая инерционность, сравнительно

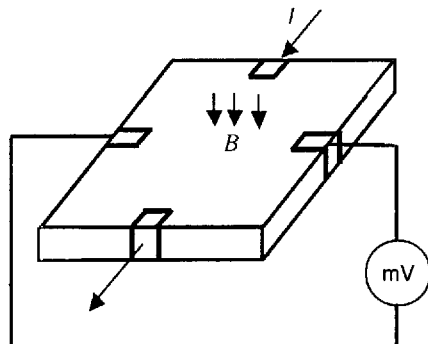


Рис. 13.17. Схема, поясняющая эффект Холла

широкий диапазон частот. Недостатками ваттметров являются зависимость чувствительности от температуры окружающей среды и малый динамический диапазон.

Рассматриваемые ваттметры используют в качестве встроенных в аппаратуру приборов для контроля проходящей средней и импульсной мощностей.

13.3. Измерение шумовых параметров радиоэлектронных устройств

13.3.1. Шумовые параметры радиоэлектронных устройств

Для оценивания шумовых свойств радиоэлектронных устройств (РЭУ) используют следующие основные понятия и параметры: спектральная плотность мощности шума (СПМШ), коэффициент шума ($K_{ш}$), коэффициент шума стандартный ($K_{ш.с}$), коэффициент шума интегральный ($K_{ш.и}$), эффективная температура шума входа четырехполюсника ($T_{ш.эф}$).

СПМШ — это дифференциальная энергетическая характеристика, позволяющая оценивать уровень шума на входе РЭУ:

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{P_{ш}(f)}{\Delta f},$$

где $P_{ш}(f)$ — мощность сигнала шума в такой узкой полосе частот Δf , что при ее дальнейшем сужении $P_{ш}(f)$ не изменяется.

Коэффициент шума РЭУ (линейного четырехполюсника, приемного устройства) при независимости параметров шумового сигнала и РЭУ от частоты определяется как

$$K_{ш} = \frac{P_{с.вх}/P_{ш.вх}}{P_{с.вых}/P_{ш.вых}},$$

где $P_{с.вх}$, $P_{с.вых}$, $P_{ш.вх}$, $P_{ш.вых}$ — номинальные мощности сигнала и шума на входе и выходе четырехполюсника.

Вводя коэффициент усиления по мощности $K_P = P_{с.вых}/P_{с.вх}$, можно записать

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.вх} K_P}, \quad (13.10)$$

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.вх} + P_{ш.вх.соб}}{P_{ш.вх}} = 1 + \frac{P_{ш.вх.соб}}{P_{ш.вх}}, \quad (13.11)$$

где $P_{ш.вх.соб}$ — мощность собственных шумов четырехполюсника, приведенная к эквиваленту на входе.

В идеальном четырехполюснике собственные шумы отсутствуют, т.е. $K_{ш} = 1$. Таким образом, $K_{ш}$ реальных четырехполюсников показывает,

во сколько раз шумы на выходе реальных четырехполосников больше шумов идеального четырехполосника.

Из (13.11) следует, что $K_{ш}$ зависит не только от параметров РЭУ, но и от шумового сигнала на его входе ($P_{ш.вх}$). Поэтому, чтобы избежать неоднозначности, используют нормированное значение мощности шума на входе устройства ($P_{ш.о}$) и вводят понятие коэффициента шума стандартного.

Коэффициент шума стандартный определяется по формуле

$$K_{ш.с} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.о} K_P}.$$

За $P_{ш.о}$ принимается мощность тепловых шумов согласованной нагрузки на входе четырехполосника при температуре $T = 293,16$ К (20°C).

По аналогии с (13.11) можно записать

$$K_{ш.с} = \frac{P_{ш.с} + P_{ш.вх.соб}}{P_{ш.о}} = 1 + \frac{P_{ш.вх.соб}}{P_{ш.о}}, \quad (13.13)$$

где $K_{ш.с}$ — стандартный коэффициент шума.

В реальных условиях величина мощности шумов зависит также от спектра частот, в котором проводится измерение, поэтому нормируется также СПМШ. За нормированное значение СПМШ принимается величина в одну единицу kT_0 (ка-тэ-ноль), равная СПМШ согласованной нагрузки при $T_0 = 293,16$ К. $1 kT_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К $\times 293,16$ К = $4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц, где k — постоянная Больцмана.

С учетом (13.10) можно записать

$$K_{ш.с} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.о} K_P} = \frac{S_{вых} \Delta f}{S_0 \Delta f K_P} = \frac{S_{вых}}{S_0} K_P,$$

где S_0 — нормированное значение СПМШ; $S_{вых}$ — СПМШ на выходе четырехполосника.

По аналогии с (13.12) можно записать

$$K_{ш.с} = 1 + \frac{S_{ш.вх.соб}}{S_0} = 1 + \frac{S_{ш.вх.соб}}{kT_0}.$$

Реально полоса частот РЭУ не может быть бесконечно узкой, поэтому применяется усредненный коэффициент шума.

Коэффициент шума интегральный (усредненный) в полосе частот Δf определяется по формуле

$$K_{ш.и} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.вх} K_P} = \frac{P_{ш.вых}}{kT_0 \Delta f K_P},$$

где $kT_0 \Delta f K_P$ — мощность шумов на выходе четырехполосника при температуре стандартного источника; Δf — полоса пропускания.

Если учесть, что полный шумовой сигнал на выходе состоит из шу-

мов источника и собственных шумов четырехполюсника, то

$$K_{ш.и} = 1 + \frac{P_{ш.вх.соб}}{kT_0\Delta f}.$$

Для маломощных РЭУ оценивание шумов по коэффициенту шума неудобно. Для таких устройств используется другой параметр — эффективная температура шума, т.е. температура некоторого условного теплового источника, расположенного на входе исследуемого РЭУ.

Эффективная температура шума входа четырехполюсника ($T_{ш.эф}$) связана с коэффициентом шума следующим соотношением:

$$T_{ш.эф} = (K_{ш} - 1)T_0, \quad (13.13)$$

Расчет $T_{ш.эф}$ по формуле (13.13) делать нецелесообразно, так как могут иметь место большие погрешности при малых значениях $K_{ш}$. Поэтому $T_{ш.эф}$ рекомендуется измерять.

13.3.2. Измерение шумовых параметров методом двух отсчетов

Данный метод наиболее распространен для измерения шумовых параметров приемных усилительных устройств (ПУУ).

Структурная схема измерения показана на рис. 13.18. Сущность метода: на вход исследуемого четырехполюсника поочередно подаются от генераторов шума с известными параметрами два шумовых сигнала. На выходе четырехполюсника проводится измерение значений шумовых параметров с помощью измерителя отношения шумовых сигналов (ИОШС) типа Х5.

Расчет значения шумового параметра проводится по следующим формулам:

$$K_{ш} = \frac{T_2 - T_1}{N - 1}; \quad T_{ш} = \frac{T_2 - NT_1}{N - 1},$$

где $N = \alpha_2/\alpha_1$ — относительное изменение уровня мощности сигнала на выходе четырехполюсника при двух различных значениях входных сигналов; α_1 и α_2 — показания прибора, пропорциональные мощности шумового сигнала на выходе четырехполюсника при включенном ГШ-1 и ГШ-2 соответственно; T_1 , T_2 — относительные шумовые температуры, подаваемые на вход испытуемого четырехполюсника.

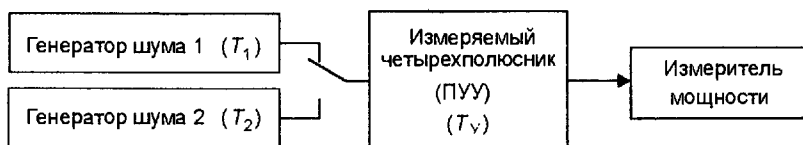


Рис. 13.18. Структурная схема измерения шумовых параметров методом двух отсчетов

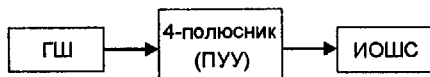


Рис. 13.19 Структурная схема измерения шумовых параметров методом двух отсчетов с использованием одного генератора шума

Разновидность метода двух отсчетов с использованием одного генератора шума показана на рис. 13.19.

В данной схеме ИОШС подключают к выходу линейной части, т.е. до каскадов с нелинейным преобразованием сигналов.

В качестве первого шумового сигнала используется СПМШ с ГШ в выключенном состоянии. В выключенном состоянии ГШ обеспечивает нормированное значение мощности $P_{ш.о} (S_0)$.

Второй шумовой сигнал подается от включенного ГШ. Величина этого сигнала $P_{ш.г} (S_r)$ определяется из эксплуатационной документации ГШ.

Коэффициент шума определяется по следующим расчетным формулам:

$$K_{ш.с} = \frac{S}{N-1}; \quad K_{ш.с} = \frac{T-1}{N-1},$$

где S — СПМШ генератора в относительных единицах нормирования по $S_0 = kT_0$; T — относительная шумовая температура генератора; $N = \alpha_2/\alpha_1$; α_1, α_2 — показания ИОШС.

Заметим, если показания прибора, используемого в качестве ИОШС, пропорциональны не мощности, а напряжению шумового сигнала, т.е.

$$N = (\alpha_2/\alpha_1)^2,$$

то рассматриваемый метод двух отсчетов можно модифицировать, если в схеме измерения (рис. 13.20) использовать регулируемый генератор шума и обеспечить $N = 2$.

Мощность регулируемого ГШ (СПМШ) в данном случае становится равной величине мощности собственных шумов ПУУ, т.е. $K_{ш}$ ПУУ численно равен СПМШ генератора шума в относительных единицах:

$$K_{ш.с} = \frac{S}{N-1} = \frac{S}{2-1} = S; \quad K_{ш.с} = T-1.$$

При использовании метода двух отсчетов имеют место погрешности измерения из-за собственных шумов индикатора и погрешности измерения отношения N . Указанные погрешности уменьшаются при использо-

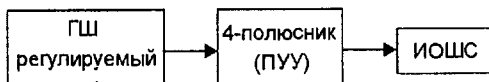


Рис. 13.20. Структурная схема измерения шумовых параметров методом двух отсчетов с использованием регулируемого генератора шума



Рис. 13.21. Структурная схема измерения шумовых параметров методом двух отсчетов с использованием аттенюатора

вании в схеме измерения аттенюатора Атт. (рис. 13.21). В этом случае добиваются одинаковых показаний измерителя при двух различных положениях переключателя аттенюатора (n_1 и n_2). Результат измерения соответствует в данном случае следующему равенству:

$$T = \left(T_2 - \frac{n_2}{n_1} T_1 \right) / \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right).$$

а измерение мощностей шумовых сигналов заменяется измерением отношений уровней сигналов с частотной модуляцией.

Одна из разновидностей схем, реализующая рассматриваемый метод, показана на рис. 13.22.

На схеме приняты следующие обозначения:

ГШК — генератор шума калиброванный;

МГ — модуляционный генератор (низкочастотный) (меандр);

П — широкополосный супергетеродинный приемник;

Д — детектор (квадратичный);

У — узкополосный фильтр-усилитель, настроенный на частоту модулирующего напряжения;

СД — синхронный детектор;

ФНЧ — фильтр нижних частот (с постоянной времени несколько секунд).

В основе метода использовано раздельное измерение уровня шума (температуры шума) ГШК и исследуемого устройства.

Первоначально переключатель подключают к ГШК. Проводят калибровку индикатора измерительного устройства. ГШК модулируется

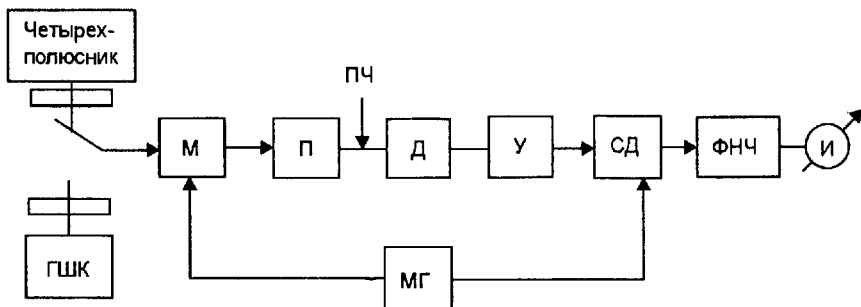


Рис. 13.22. Структурная схема измерения шумовых параметров

низкочастотным сигналом (типа меандр). Переменная составляющая, выделенная узкополосным усилителем $У$ из разностного сигнала, пропорциональна уровню шума (температуре шума) ГШК.

На втором этапе измерения ГШК выключают и к модулятору подключают исследуемое устройство. Переменная составляющая разностного сигнала пропорциональна в данном случае уровню шума (температуре шума) исследуемого четырехполюсника.

Таким образом, если сериями последовательностей импульсов поочередно модулировать сигнал с ГШК и четырехполюсника и на выходе усилителя $У$ синхронно разделять сигналы, пропорциональные уровню шума (температуре шума), то по шкале индикатора можно непрерывно измерять $K_{ш}$ четырехполюсника.

Достоинства схемы: высокая чувствительность; возможность подключения через направленные ответвители, т.е. возможность измерения при работе четырехполюсника на реальную нагрузку (антенну).

Разновидностью модуляционного метода является нулевой модуляционный метод, где измерительный приемник используется в качестве нуль-индикатора, а отсчет отношений уровней сигналов для определения коэффициента шума (шумовой температуры) осуществляется по шкале измерительного аттенюатора.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение мгновенной, полной, активной и реактивной мощности.
2. Назовите основные методы измерения мощности в различных частотных диапазонах.
3. Поясните принцип действия и особенности включения электромеханического ваттметра в электрическую цепь.
4. Какие математические операции лежат в основе метода перемножения при измерении мощности?
5. Какие методы используют при построении ваттметров поглощаемой мощности?
6. В чем суть калориметрического метода измерения мощности?
7. Поясните принцип действия ваттметров проходящей мощности на основе направленных ответвителей.
8. На чем основан термоэлектрический метод измерения мощности?
9. Поясните принцип действия ваттметров, работающих на основе эффекта Холла.
10. Назовите и поясните основные шумовые параметры, используемые для оценивания шумовых свойств радиоэлектронных устройств.
11. Поясните схему измерения шумовых параметров четырехполюсников методом двух отсчетов.
12. На чем основан модуляционный метод измерения параметров четырехполюсников?

Измерение фазового сдвига и фазового дрожания цифрового сигнала

14.1. Измерение фазового сдвига

14.1.1. Основные понятия и определения

Для гармонического сигнала $U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ фаза определяется аргументом $(\omega t + \varphi)$ синусоидальной функции.

Фазовым сдвигом называется модуль разности аргументов двух гармонических сигналов одной частоты $U_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$, $U_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$, т.е. разность начальных фаз

$$\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2).$$

В данном случае фазовый сдвиг является постоянной величиной и не зависит от момента отсчета.

Обозначим через t_1 и t_2 моменты времени, когда переменное напряжение двух гармонических сигналов одинаковой частоты имеет одинаковую фазу (рис. 14.1), тогда можно записать следующие равенства:

$$\begin{aligned} \omega t_1 + \varphi_1 &= \omega t_2 + \varphi_2; \\ \varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 = \omega(t_2 - t_1) = \omega \Delta T; \\ \varphi &= 2\pi(t_2 - t_1)/T; \\ \varphi &= 360^\circ(t_2 - t_1)/T = 360^\circ \frac{\Delta T}{T}. \end{aligned} \tag{14.1}$$

Понятие фазового сдвига имеет смысл и для двух периодических сигналов сложной формы с одинаковыми периодами, если условно при одинаковых фазах сигналов напряжения в моменты перехода через нуль будут иметь одно направление (например, из отрицательных значений в положительные).

Сдвиг фаз между двумя гармоническими сигналами с равными частотами принято изображать при помощи векторных диаграмм. Колебания изображают неподвижными векторами, угол между которыми равен фазовому сдвигу (разности фаз).

Если гармонические сигналы имеют разные частоты, т.е.

$$U_1 = U_{m1} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \text{ и } U_2 = U_{m2} \cos(\omega_2 t + \varphi_2),$$

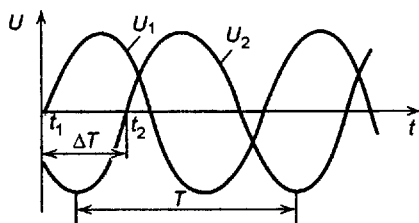


Рис. 14.1. Временная диаграмма фазового сдвига двух сигналов одинаковой частоты

то фазовый сдвиг

$$\varphi = (\omega_1 t + \varphi_1) - (\omega_2 t + \varphi_2) = (\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Явление зависимости фазового сдвига от частоты $f(\omega)$ негативно проявляется при прохождении многочастотного широкополосного сигнала (например, телевизионного) через четырехполосник. Форма сигнала на выходе четырехполосника не совпадает с формой на входе, так как разные частотные составляющие запаздывают на разное время.

Для характеристики четырехполосника (каналов связи) используется понятие группового времени запаздывания $t_{гвз}$, которое определяется как первая производная от сдвига фазы (от фазочастотной характеристики) по круговой частоте:

$$t_{гвз} = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}. \quad (14.2)$$

Из (14.2) следует, что $t_{гвз}$ характеризуется наклоном фазочастотной характеристики $\varphi(\omega)$.

Заменяя бесконечно малые приращения в (14.2) конечными приращениями, получаем

$$t_{гвз} = \frac{\Delta\varphi(\omega)}{\Delta\omega},$$

где $\Delta\varphi(\omega)$ — изменение фазового сдвига на выходе четырехполосника при изменении частоты $\Delta\omega$.

14.1.2. Осциллографический метод измерения фазового сдвига

При осциллографическом методе фазовый сдвиг определяется по характеру и форме осциллограмм.

Осциллографический метод нашел наибольшее распространение при использовании линейной и синусоидальной развертки осциллографа. Используют также способ круговой развертки.

При способе *линейной развертки* на экране двухканального или двухлучевого осциллографа получается осциллограмма, содержащая изображение целых периодов измеряемых сигналов (рис. 14.2).

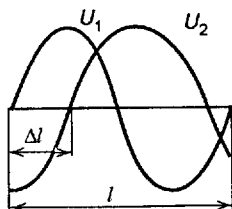


Рис. 14.2. Осциллограмма фазового сдвига при линейной развертке

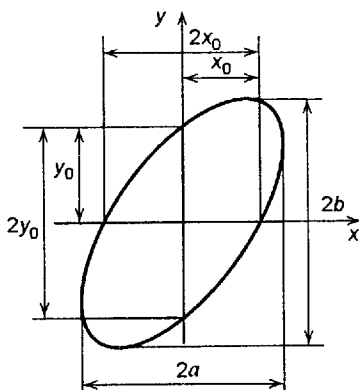


Рис. 14.3. Осциллограмма фазового сдвига при синусоидальной развертке

Фазовый сдвиг вычисляется по формуле (14.1) при условиях $\Delta l \approx \Delta T$ и $l \approx T$:

$$\varphi = 360^\circ \frac{\Delta l}{l}. \quad (14.3)$$

При способе *синусоидальной развертки* используется одноручевой осциллограф при выключенном генераторе развертки. В каналы вертикального и горизонтального отклонения осциллографа подаются напряжения $U_y = U_{my} \sin(\omega t + \varphi)$ и $U_x = U_{mx} \sin \omega t$ соответственно.

Фазовый сдвиг отсчитывается при появлении на экране осциллограммы в форме эллипса (рис. 14.3), уравнение которого записывается в виде

$$y = \frac{b}{a}(x \cos \varphi + \sqrt{a^2 - x^2} \sin \varphi), \quad (14.4)$$

где b , a — амплитуда отклонения луча в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно. В зависимости от фазового сдвига между U_x и U_y форма и наклон эллипса будут изменяться.

Из осциллограммы, представленной на рис. 14.3, и уравнения эллипса (14.4) следует, что при $x = 0$ получается вертикальный отрезок $y_0 = b \sin \varphi$, а при $y = 0$ — горизонтальный отрезок $x_0 = a \sin \varphi$. Если перед измерением обеспечить равенство максимальных отклонений по горизонтали и вертикали, т.е. обеспечить $a = b$, то

$$\sin \varphi = \pm(2y_0/2b) = \pm(2x_0/2a)$$

и

$$\varphi = \pm \arcsin(2y_0/2b) = \pm \arcsin(2x_0/2a). \quad (14.5)$$

Таким образом, для вычисления фазового сдвига φ достаточно по осциллограмме определить значения отрезков $2x_0$ ($2y_0$), $2a$ ($2b$) и подставить в формулу (14.5).

Таблица 14.1

Определение значения фазового сдвига

Значение фазового сдвига	Положение большой оси эллипса на квадрантах плоскости
$0^\circ < \varphi < 90^\circ$; $180^\circ < \varphi < 360^\circ$	I, III
$90^\circ < \varphi < 180^\circ$; $180^\circ < \varphi < 270^\circ$	II, IV
$\varphi = 90^\circ$; $\varphi = 270^\circ$	Совпадает с осями координат

Однако, как следует из формулы (14.5), значение фазового сдвига φ не получается однозначным. Оно определяется положением большой оси эллипса на плоскости осей координат (табл. 14.1).

Для устранения указанной неоднозначности необходимо в один из каналов отклонения осциллографа ввести одноканальный фазовый сдвиг 90° . Действительный фазовый сдвиг определяется с учетом положения большой оси эллипса после введения дополнительного сдвига. Например, при расположении большой оси эллипса в первом и третьем квадрантах имеется неопределенность: сдвиг φ равен 45 или 315° . Если после введения дополнительного сдвига $\varphi = 90^\circ$ большая ось эллипса осталась в тех же квадрантах, то $\varphi = 315^\circ$, а если переместилась во второй и четвертый квадранты, то $\varphi = 45^\circ$.

Иногда для непосредственного отсчета фазы применяют специальную шкалу, нанесенную на оси координат.

14.1.3. Компенсационный метод измерения фазового сдвига

Компенсационный метод измерения фазового сдвига основан на сравнении измеряемого фазового сдвига с фазовым сдвигом в образцовом фазовращателе. Основные элементы компенсационного фазометра (рис. 14.4): образцовый (калиброванный) фазовращатель, установочный (вспомогательный) фазовращатель и индикатор сдвига фаз.

Процедуру измерения компенсационным методом рассмотрим для случая, когда в качестве индикатора используется осциллограф. С помощью переключателя П напряжение $U_1 = U_{m1} \sin \omega t$ сначала подают на оба входа Y и X осциллографа. Указатель образцового фазовращателя устанавливают на нуль и, используя установочный фазовращатель в измерительной цепи канала Y, устраняют собственный фазовый сдвиг. В момент компенсации фазового сдвига на экране осциллографа наблюдается прямая линия.

Затем с помощью переключателя П напряжение U_1 подают в канал Y, а напряжение $U_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$ — в канал X. С помощью образцового фазовращателя на экране осциллографа вновь устанавливается осциллограмма в виде прямой линии.

Измеряемый фазовый сдвиг отсчитывают по показанию образцового фазовращателя, а осциллограф используют в качестве нуль-индикатора.

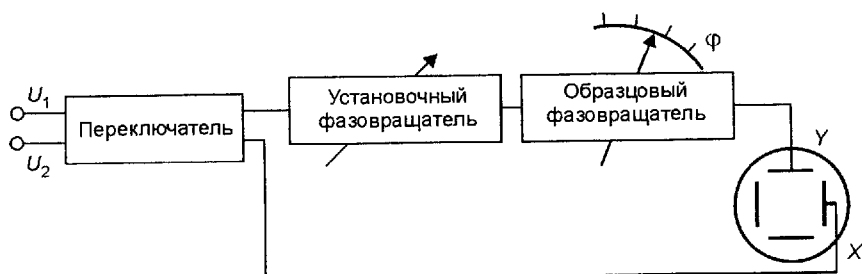


Рис. 14.4. Упрощенная схема компенсационного фазометра

14.1.4. Метод преобразования фазового сдвига во временной интервал

Упрощенная структурная схема, реализующая рассматриваемый метод, представлена на рис. 14.5, а временные диаграммы, поясняющие принцип действия схемы, — на рис. 14.6.

Формирующие устройства 1 и 2 вырабатывают прямоугольные импульсы, длительности которых равны половине периода напряжений u_1 и u_2 , поступающих на их входы, а фронты импульсов совпадают с моментами перехода указанных напряжений через нуль. В качестве формирующих устройств могут использоваться мультивибраторы.

В дифференцирующих цепях 1 и 2 прямоугольные импульсы дифференцируются, полученные короткие импульсы точно соответствуют моментам переходов через нуль исходных напряжений. Положительные короткие импульсы используются для управления триггером. На выходе триггера вырабатываются импульсы постоянной амплитуды, длительность которых ΔT равна фазовому сдвигу φ .

Среднее значение тока $I_{\text{ср}}$ на выходе триггера линейно зависит от разности фаз выходных сигналов:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{\Delta T} I_{\text{тр}} dt = I_{\text{тр}} \frac{\Delta T}{T} = K\varphi.$$

Показание прибора, включенного в цепь триггера, пропорционально среднему значению тока за период и, следовательно, пропорционально разности фаз входных сигналов.

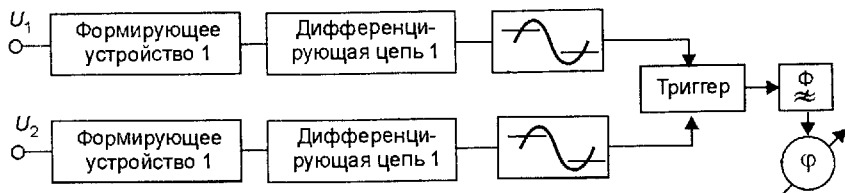


Рис. 14.5. Схема реализации метода преобразования фазового сдвига во временной интервал

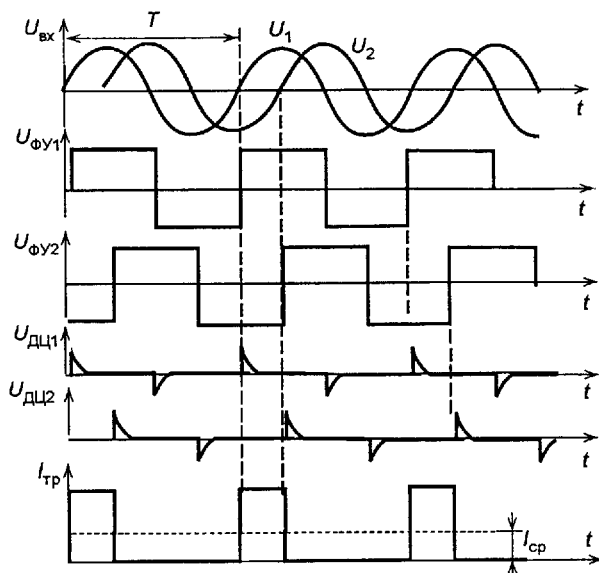


Рис. 14.6. Временные диаграммы метода преобразования фазового сдвига во временной интервал

14.1.5. Метод дискретного счета

Суть метода поясняются структурной схемой прибора и временными диаграммами, представленными на рис. 14.7 и 14.8 соответственно.

Основные элементы схемы: два формирующих устройства ФУ, два временных селектора ВС, генератор счетных импульсов ГСИ, делитель частоты ДЧ, электронный счетчик ЭС и цифровой индикатор ЦИ.

В момент перехода напряжения U_1 через нуль в УУ формируется стартовый импульс, запускающий ВС1. В момент перехода напряжения U_2 через нуль в УУ формируется стоповый импульс, закрывающий ВС1.

За интервал времени ΔT между стартовым и стоповым импульсами через ВС1 от ГСИ проходит группа из n импульсов:

$$n = \frac{\Delta T}{T_{сч}} = \Delta T f_{сч},$$

где $T_{сч}$ — период следования счетных импульсов.

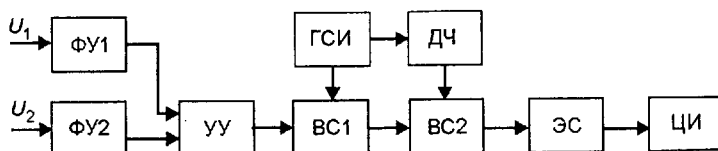


Рис. 14.7. Структурная схема реализации метода дискретного счета

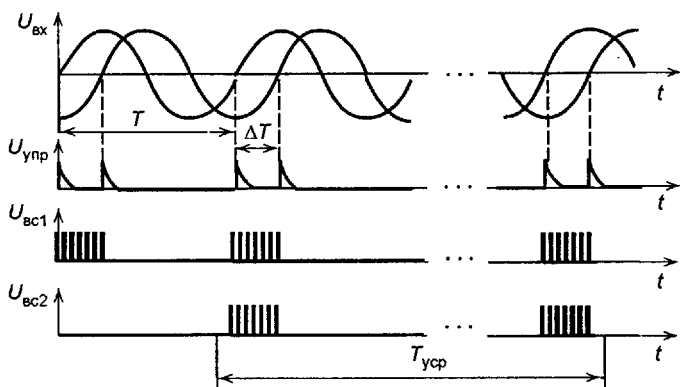


Рис. 14.8. Временные диаграммы метода дискретного счета

Для снижения погрешности счета импульсы считаются на интервале времени усреднения T_{yc} , равном m периодам входного сигнала T , т.е. $T_{yc} = mT$.

Общее число счетных импульсов, поступающих на счетчик,

$$N = nm = \frac{\Delta T}{T_{сч}} \frac{T_{yc}}{T}. \quad (14.6)$$

Из формулы (14.1) следует, что

$$\Delta T = \frac{\varphi T}{360^\circ}. \quad (14.7)$$

С учетом (14.7) получаем

$$N = \frac{\varphi T T_{yc}}{360^\circ T_{сч} T} = \frac{T_{yc}}{T_{сч} \cdot 360^\circ} \varphi.$$

Вводя обозначения $T_{yc}/T_{сч} = k$, где k — коэффициент умножения периода, а $1/k$ — коэффициент деления частоты, получаем

$$\varphi = \frac{360^\circ}{k} N = aN.$$

Погрешность измерения в данном методе определяется погрешностью дискретизации, которая складывается из возможности потери одного счетного импульса в группе и возможности потери части группы в интервале усреднения.

На основании детального анализа диаграммы (см. рис. 14.8) можно записать

$$\Delta \varphi_{\max} = \frac{90^\circ}{f T_{yc}} = \frac{90^\circ}{m},$$

где f — частота исследуемых напряжений.

14.2. Измерение группового времени запаздывания

Четырехполосник (канал связи) не вносит искажений, если групповое время запаздывания $t_{гвз}$ сохраняется постоянно во всем диапазоне частот сигнала, проходящего через четырехполосник. Известно несколько схемных методов измерения $t_{гвз}$, суть которых заключается в измерении разности сдвига угла ФЧХ при определенном изменении частоты сигнала.

Наибольшее распространение получил метод Найквиста, согласно которому групповое время запаздывания на какой-то частоте принимается равным времени распространения огибающей сигнала, полученного при амплитудной модуляции несущего колебания этой частоты колебанием более низкой частоты.

В соответствии с этим методом проводится сравнение фазового сдвига огибающей модулированного по амплитуде сигнала на входе и выходе исследуемого четырехполосника.

Упрощенная схема, реализующая данный метод, показана на рис. 14.9. Амплитудно-модулированный сигнал (АМ) поступает на два амплитудных детектора (АД): на АД-1 — с выхода исследуемого четырехполосника, и на АД-2 — со входа того же четырехполосника. Огибающие АМ сигналов с выходов АД-1 и АД-2 подаются на входы фазометра, с помощью которого измеряется фазовый сдвиг между ними.

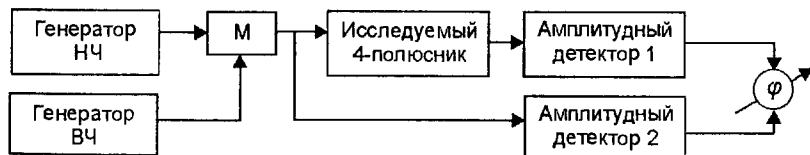


Рис. 14.9. Схема измерения группового времени запаздывания

В соответствии с формулой (14.2)

$$t_{гвз} = \varphi / 2\pi F.$$

Значения частоты F низкочастотного генератора, сигнал с выхода которого поступает на модулятор M , является фиксированным ($F = \text{const}$) и составляет обычно сотые доли от частоты высокочастотного генератора, поэтому шкала прибора градуируется в $t_{гвз}$.

14.3. Измерение фазового дрожания цифрового сигнала

Фазовое дрожание цифрового сигнала в цифровых системах передачи возникает по ряду причин. Это прежде всего шумы и помехи в

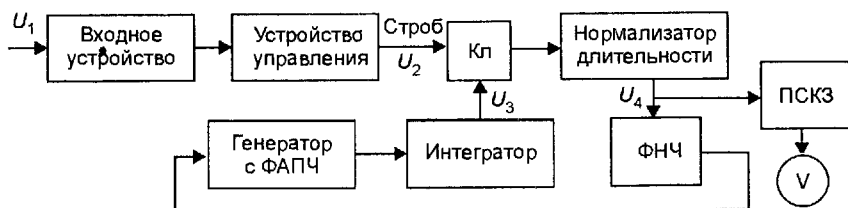


Рис. 14.10. Схема реализации метода преобразования фазового сдвига в амплитудно-модулированные импульсы

линейном тракте цифровых систем передачи, а также искажения цифрового сигнала. Указанные причины приводят к дрожанию фазы стробирующих импульсов, определяющих момент регенерации сигнала, а следовательно, и к дрожанию самого цифрового сигнала, которое накапливается в процессе многократной регенерации сигнала в тракте системы передачи.

Установлено, что закон изменения (дрожания) фазы цифрового сигнала является нормальным. В качестве основных характеристик фазового дрожания принято использовать его среднеквадратическое и пиковое значения.

Рассмотрим основные методы измерения фазового дрожания. Для измерения малых дрожаний цифровых сигналов используется метод измерения, основанный на преобразовании фазового сдвига в импульсы, амплитуда которых пропорциональна этому сдвигу.

Структурная схема прибора, реализующего данный метод, приведена на рис. 14.10. Исследуемый сигнал U_1 через входное устройство поступает на устройство управления, обеспечивающее в момент появления фронтов импульсов исследуемого сигнала формирование строб-импульсов U_2 , замыкающих ключ Кл.

На второй (сигнальный) вход ключа поступает напряжение треугольной формы U_3 с выхода интегратора. Интегратор управляется сигналом с выделителя тактовой частоты, чем обеспечивается стабильность периода напряжения треугольной формы. На выходе ключа образуются короткие импульсы, модулированные по амплитуде. Амплитуда импульсов пропорциональна фазовому сдвигу (рис. 14.11). В нормализаторе длительности происходит расширение импульсов на время, равное, как правило, $T/4$. Среднеквадратическое значение фазового дрожания измеряется вольтметром V со среднеквадратическим преобразователем ПСКЗ на входе.

Второй распространенный метод измерения фазового дрожания основан на использовании фазового детектора. Структурная схема и временные диаграммы, поясняющие принцип работы прибора, представлены на рис. 14.12, а и б соответственно.

В качестве опорного хронизирующего сигнала, относительно которого измеряется фазовое дрожание в этой схеме, используется внешний сигнал тактовой частоты f_T .

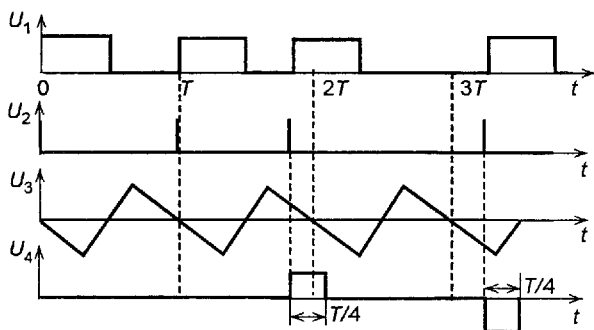


Рис. 14.11. Временные диаграммы метода преобразования фазового сдвига в амплитудно-модулированные импульсы

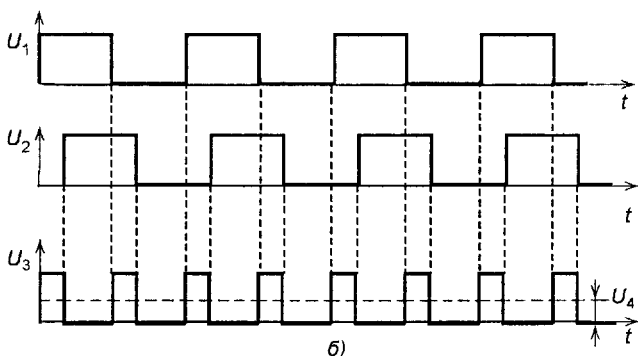
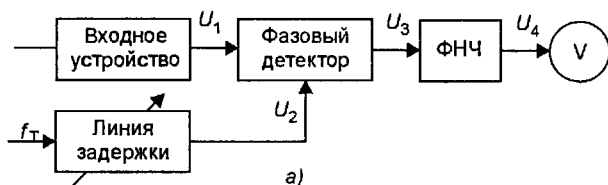


Рис. 14.12. Измеритель фазового дрожания: а — упрощенная структурная схема; б — временные диаграммы

На один вход фазового детектора через входное устройство поступает исследуемый сигнал, а на второй вход — сигнал f_T с регулируемой линии задержки. Перед измерением с помощью линии задержки добиваются минимального показания вольтметра. На выходе сумматора по модулю два образуется импульсная последовательность с длительностью импульсов, пропорциональной относительным фазовым сдвигам обоих сигналов. После прохождения через фильтр нижних частот ФНЧ усредненное значение фазового дрожания измеряется вольтметром V .

Фазовое дрожание может быть измерено также осциллографическим методом по глаз-диаграмме. Для этого исследуемый сигнал по-

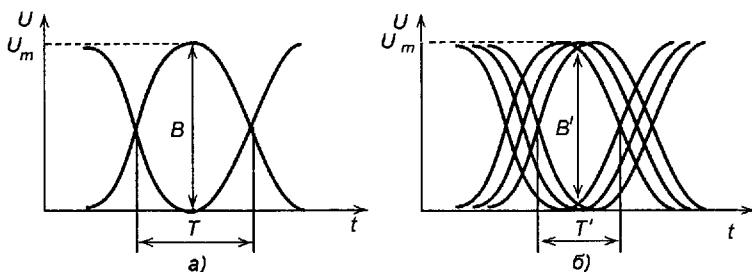


Рис. 14.13. Глаз-диаграмма: а — идеализированная; б — с учетом фазовых дрожаний

дается на вход канала вертикального отклонения. При синхронизации развертки осциллографа от сигнала тактовой частоты и при совмещении принимаемых реализаций сигнала во времени на экране осциллографа наблюдается глаз-диаграмма.

При отсутствии амплитудных искажений идеализированная глаз-диаграмма для двухуровневого однополярного сигнала показана на рис. 14.13,а, а на рис. 14.13,б — с учетом фазовых дрожаний.

Раскрыв глаз-диаграммы, т.е. расстояние между двумя уровнями в точке отсчета B' , определяет запас помехоустойчивости по амплитуде при регенерации сигнала, а ширина раскрыва T' отражает допуск на фазовое дрожание. Величина фазового дрожания определяется как относительное уменьшение раскрыва диаграммы. Дрожания приводят к уменьшению соотношения сигнал/шум и, как следствие, к увеличению вероятности ошибки.

Контрольные вопросы и задания

1. Что называется фазовым сдвигом?
2. Дайте определение групповому времени запаздывания.
3. Поясните порядок определения фазового сдвига осциллографическим методом при линейной развертке.
4. Поясните порядок определения фазового сдвига осциллографическим методом при синусоидальной развертке.
5. Почему при синусоидальной развертке возникает неоднозначность определения фазового сдвига?
6. Нарисуйте схему компенсационного измерителя фазового сдвига.
7. Используя структурную схему и временные диаграммы, поясните суть метода преобразования фазового сдвига во временной интервал.
8. Поясните суть метода дискретного счета при измерении фазового сдвига.
9. Поясните формулу, позволяющую определить групповое время запаздывания по методу Найквиста.
10. Назовите причины возникновения ошибок и фазового дрожания в цифровых системах передачи.
11. Поясните метод измерения фазового дрожания, основанный на преобразовании фазового сдвига в импульсы, амплитуда которых пропорциональна этому сдвигу.
12. Поясните метод глаз-диаграммы при измерении фазового дрожания.

Автоматизация измерений

15.1. Общая характеристика средств и проблемы автоматизации измерений

Проблема автоматизации измерений была актуальной на протяжении многих лет и остается таковой в настоящее время. Наиболее активный этап развития автоматизации измерений, начавшийся в 1970-е годы, связан с успехами в микроэлектронике, интенсивным внедрением цифровой радиоэлектронной аппаратуры, цифровых средств измерений (СИ), микропроцессоров и микроЭВМ.

По степени участия в процессе автоматизации человека принято различать частичную и полную автоматизацию. При частичной автоматизации, т.е. в автоматизированных системах, только часть измерительных операций выполняется без участия оператора. Человек в данном случае остается элементом в цепи получения измерительной информации. При полной автоматизации, т.е. в автоматических системах, весь процесс измерения осуществляется без участия человека.

В зависимости от места реализации процедур автоматизации можно выделить СИ двух уровней:

- измерительные приборы, меры и измерительные комплексы;
- информационно-измерительные системы (ИИС).

Примеры автоматизации СИ первого уровня уже рассматривались в некоторых разделах настоящего пособия. Это автономные микропроцессорные измерительные приборы, предназначенные для измерения напряжения, частоты, интервалов времени, параметров спектра сигналов и других параметров. Для таких измерительных приборов можно выделить некоторые общие характерные положительные особенности.

Микропроцессорные измерительные приборы сравнительно легко реализуются как многофункциональные. В отличие от традиционных многофункциональных приборов с жесткой логикой эти СИ являются программно-управляемыми и их функциональные возможности в основном определяются набором программ, хранящихся в ПЗУ. Упрощается процесс управления прибором, так как все или большинство функций прибора реализуются в соответствии с заданной оператором программой. Уменьшается число органов управления на передней панели прибора.

Появляются широкие возможности для выполнения вычислительных процедур в процессе проведения, например, косвенных или совокупных измерений. Необходимые в этих случаях рутинные вычисления погрешностей косвенных измерений или решение систем уравнений при совокупных измерениях возлагаются на микропроцессор, за счет чего существенно повышается производительность измерительных работ и сложная процедура измерений воспринимается как прямое измерение.

Применение микропроцессоров позволяет накапливать результаты промежуточных измерений и использовать их по определенному алгоритму для получения статистических характеристик исследуемых процессов или для улучшения метрологических характеристик измерительных приборов, например, за счет снижения (исключения) систематических, случайных или грубых погрешностей.

Использование в измерительных приборах микропроцессоров позволило не только расширить возможности и улучшить метрологические характеристики измерительных приборов, но и создавать на их основе информационно-измерительные системы. Это возможно благодаря тому, что цифровые микропроцессорные приборы и мини-ЭВМ (ПЭВМ) построены по одинаковым принципам, имеют многие идентичные узлы, объединяемые с помощью специальных технических устройств и программных средств (интерфейсов) в единую программно-управляемую систему объект контроля, СИ и ЭВМ.

ИИС — это совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки в целях представления потребителю (в том числе ввода в АСУ) в требуемом виде либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации [49].

Как следует из определения, ИИС поставляет потребителю информацию в соответствии с ее назначением и, следовательно, наряду с измерением обеспечивает все необходимое информационное обслуживание контролируемого объекта, включая автоматический сбор, представление, передачу, запоминание, регистрацию и обработку измерительной информации.

Можно считать, что ИИС обеспечивают все необходимое для реализации других более сложных информационных процедур: контроля, диагностики, управления и др. В то же время измерение, контроль, диагностика, управление имеют единую информационную природу, а их общим элементом технической реализации являются ИИС. Основываясь на указанной общности, в ряде случаев ИИС разделяют по назначению на измерительные системы, системы автоматического контроля, системы технической диагностики. Выделяют также системы распознавания образов и системы единого времени [18, 27, 51].

Заметим, что в современной литературе, кроме указанного понятия ИИС, часто используют следующие тождественные понятия: автоматизированные измерительные системы (АИС), автоматизированные

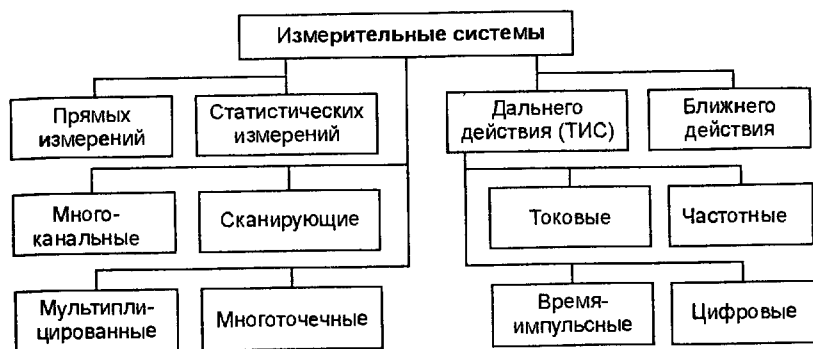


Рис. 15.1. Классификация измерительных систем

измерительные комплексы (АИК), измерительно-вычислительные комплексы (ИВК). Все указанные системы и комплексы решают примерно одинаковые задачи, а их отличие от ИИС, как правило, заключается в различии удельного веса устройств, решающих измерительные и вычислительные задачи.

К измерительным системам (ИС) принято относить ИИС, в которых преобладают функции измерения, а функции обработки и хранения незначительны или отсутствуют совсем.

Измерительные системы подразделяют на системы прямых и статистических измерений (рис. 15.1).

При прямых измерениях измерительная информация представляется в виде именованных чисел или отношений измеряемых величин и выдается, как правило, оператору.

В статистических системах измерительная информация может подвергаться математической обработке и выдаваться результат косвенных, совместных или совокупных измерений, а также параметры распределений вероятностей случайных величин.

ИС делят также на системы ближнего и дальнего действия. В системах дальнего действия (телеизмерительных системах) объекты измерения находятся на значительном удалении от средств представления или обработки информации. Телеизмерительные системы (ТИС) в отличие от систем ближнего действия для передачи информации имеют канал связи. В зависимости от параметра сигнала, несущего измерительную информацию, ТИС подразделяют на токовые, частотные, времяимпульсные и цифровые.

В зависимости от вида и числа элементов, содержащихся в схеме измерения ИС, подразделяют на следующие разновидности: многоканальные (с параллельной структурой); сканирующие (с последовательной структурой); мультиплицированные (с общей мерой); многоточечные (с параллельно-последовательной структурой).

Системы автоматического контроля (САК), являясь разновидностями ИИС, обеспечивают контроль за состоянием различных объектов. В

отличие от ИС в САК измеряемая величина сравнивается не с мерой, а с нормой, что позволяет установить соответствие между состоянием объектов и заданной нормой, т.е. выдавать информацию об исправности или неисправности контролируемого объекта. Если САК могут выдавать информацию о предполагаемом состоянии объекта в будущем, то это прогнозирующий контроль.

Современные САК подразделяют на системы непрерывного контроля и системы с дискретным последовательным контролем параметров. При непрерывном контроле параметров объекта САК содержат в каждом канале контроля сравнивающее устройство СУ и устройство индикации отклонений. При дискретном контроле САК имеют одно сравнивающее устройство, параметры которого при необходимости могут меняться, и измерительный коммутатор ИК, управляемый устройством управления УУ. Информация с объекта контроля в таких системах поступает на СУ через ИК поочередно.

Системы технической диагностики (СТД) в отличие от САК не только выдают информацию о состоянии контролируемого объекта (исправен или неисправен), но и обеспечивают локализацию места неисправности (отказа). Задача отыскания узла, вызвавшего неисправность, является наиболее сложной в процессе диагностики.

15.2. Принцип построения информационно-измерительных систем и классификация интерфейсов

Основой построения современной ИИС является агрегатный (модульный) принцип, позволяющий создавать измерительную систему из конструктивно законченных изделий. Получили распространение два вида агрегатных измерительных систем: приборно-модульные и функционально-модульные. В приборно-модульных измерительных системах агрегируемыми модулями являются приборы, а в функционально-модульных — функциональные узлы измерительных приборов: усилители, преобразователи, функционально законченные измерительные платы (одноплатные приборы).

Взаимодействие модулей в ИИС осуществляется на интерфейсной основе. Интерфейс (от англ. interface — сопрягать, согласовывать) — это устройство сопряжения. Применительно к ИИС под интерфейсом обычно понимается совокупность механических, электрических и программных средств, позволяющих объединить в единую систему объект контроля, СИ и ЭВМ. Интерфейсы, используемые в измерительной технике, принято называть измерительными интерфейсами.

В соответствии с видами агрегируемых систем различают системно-приборные и системно-модульные интерфейсы. Применительно к ЭВМ существует понятие машинных интерфейсов, позволяющих осуществить соединение центрального процессора ЭВМ с другими ее функциональными блоками и периферийными устройствами.

По отношению к интерфейсу каждый модуль ИИС может быть контроллером, прибором-источником (ПИ) или прибором-приемником (ПП) информации. Контроллер осуществляет управление обменом информацией, он координирует и контролирует действия отдельных устройств, т.е. это управляющий модуль. Передатчик (источник) передает информацию в другие приборы, а приемник воспринимает информацию от других модулей. Каждый из модулей ИИС может выполнять одну или несколько из указанных функций.

Принципиально важной задачей, решаемой при создании ИИС, является обеспечение совместимости модулей. Совместимость модулей — это их приспособленность к согласованной совместной работе в предусмотренных сочетаниях. Различают следующие виды совместимостей [39]: информационную, электрическую, энергетическую, конструктивную, метрологическую, эксплуатационную. Рассмотрим их суть.

Информационная совместимость обеспечивается путем унификации и нормирования видов и параметров сигналов на входах и выходах сопрягаемых модулей, а также нормирования алгоритмов обмена данными между ними. Информационные взаимосвязи обеспечиваются сигналами нескольких разновидностей: управляющими, программными, информационными, адресными и др.

Электрическая совместимость распространяется на статические и динамические параметры электрических сигналов, а также среду их распространения и техническую реализацию приемопередающих элементов.

Для обеспечения электрической совместимости устанавливают: уровни сигналов и пределы их изменения; значения допустимой емкости и резистивной нагрузки устройств; допустимые длины линий и порядок их подключения к разъемам; средства и способы обеспечения помехоустойчивости.

Энергетическая совместимость определяет требования к виду и параметрам питающих напряжений, например, 220 ± 22 В, $115 \pm 11,5$ В, $50 \pm 0,5$ Гц, 400 ± 4 Гц, 27 ± 3 В. Энергетическая совместимость наиболее важна для измерительных систем функционально-модульного построения.

Конструктивная совместимость предполагает согласованность конструктивных параметров модулей при их совместном использовании или унификацию модулей и их компоновку в единый конструктивно законченный комплекс. Унификации подлежат габаритные и присоединительные размеры плат, модулей, шкафов, кронштейнов, направляющих каркасов, разъемов и др.

Метрологическая совместимость предусматривает однотипность метрологических характеристик всех СИ, используемых в измерительной системе и сопоставимость результатов измерений.

Эксплуатационная совместимость предполагает для всех элементов системы единые требования по надежности, уровню электромагнитных помех и др.

Таблица 15.1

Классификация интерфейсов

Признак	Виды интерфейсов
По способу соединения функциональных блоков ИИС	Магистральные, радиальные, цепочные, смешанные
По способу передачи информации в ИИС	Параллельные, последовательные, параллельно-последовательные
По принципу обмена информацией	Синхронные, асинхронные
По режиму передачи информации	Двусторонне-одновременные, двусторонне-поочередные, односторонние
По функциональному назначению	Системные, мультипроцессорных систем, периферийного оборудования, сетей передачи данных, модулей и приборов, локальных вычислительных сетей, распределенных систем, локальных сетей микроконтроллеров
По конструктивному исполнению	Межблочные, внутриблочные, внутрислотовые, внутрикорпусные

Наряду с понятием «интерфейс» часто используют понятие «протокол». Протокол — это строго заданная процедура или совокупность правил, определяющая способ выполнения определенного класса функций соответствующими устройствами.

Практически любой интерфейс содержит некоторые элементы протокола. В этом смысле понятие «интерфейс» шире понятия «протокол».

В настоящее время известно большое многообразие интерфейсов, которые можно классифицировать по ряду признаков (табл. 15.1): по способу соединения функциональных блоков; способу передачи информации; принципу обмена информацией; режиму передачи информации; функциональному назначению; конструктивному исполнению.

По способу соединения функциональных блоков (по топологии) различают магистральные, радиальные, цепочные и смешанные интерфейсы.

В цепочных интерфейсах (рис. 15.2,а) модули соединены последовательно.

Управляющий модуль в таких структурах может отсутствовать. Применяют цепочные интерфейсы в сравнительно простых системах с малым числом автономных приборов. Если вход и выход цепочки подключаются к управляющему модулю, то цепочную структуру называют петлевой. В чисто цепочной структуре происходит последовательная обработка информации по мере ее продвижения по цепочке. Каждый модуль выделяет предназначенное для него сообщение и на его место размещает свое. В петлевой структуре образуется последовательная магистраль, и любой модуль практически имеет доступ к управляющему модулю.

В радиальной структуре (рис. 15.2,б) каждый модуль связан с управляющим модулем индивидуальной шиной, адресация определяется но-

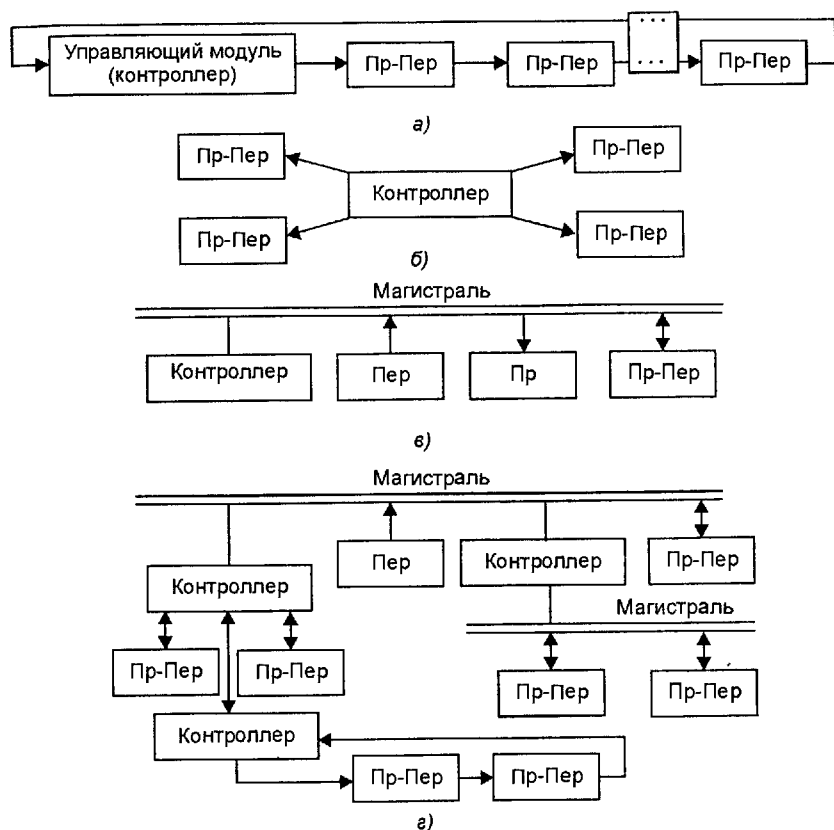


Рис. 15.2. Графическое представление различных интерфейсов: Пр — приемник; Пер — передатчик

мером индивидуальных шин. Скорость обмена информацией в такой структуре максимальная. Если управляющий модуль имеет возможность подключаться к большому количеству линий, то необходимы расширители ввода-вывода, а это требует необходимости адресации модулей, т.е. теряется достоинство радиальной структуры. Широкое распространение радиальных структур ограничивается трудностями наращивания или перестройки.

В системах с магистральной структурой (рис. 15.2, в) модули подключают к коллективной шине. Имеются возможность обмена информацией между любыми модулями и возможность поочередного управления от нескольких управляющих модулей. По сравнению с радиальной структурой здесь меньше затрат на соединительное оборудование, но скорость обмена ниже. В настоящее время данная система получила широкое распространение. Наиболее предпочтительное ее использование — в системах с большим количеством модулей.

Пример смешанной структуры соединения показан на рис. 15.2, г. Смешанное (гибридное) соединение модулей дает возможность повысить производительность отдельных подсистем, уменьшить конструктивную и энергетическую избыточность.

По способу передачи информации различают параллельные, последовательные и параллельно-последовательные системы.

В параллельных интерфейсах обмен информацией (данными) осуществляется за один такт обмена (одну посылку). Параллельный обмен предполагает фиксированную разрядность устройств.

При последовательном обмене все сообщения передаются последовательно по общей линии. Последовательная структура интерфейса находит применение в территориально разнесенных системах или в системах с распределенной обработкой информации с малой интенсивностью потоков информации.

Смешанный параллельно-последовательный (байтовый) способ широко используется в системах с различной разрядностью представления данных у разных устройств.

По режиму передачи информации различают следующие интерфейсы: с двусторонней одновременной передачей (дуплексные); с двусторонней поочередной передачей (полудуплексные); с односторонней передачей (симплексные).

Дуплексный режим предусматривает наличие двух линий обмена и отличается наибольшей интенсивностью обмена. Полудуплексный режим применяется при магистральном соединении модулей и в системах с разделением во времени. Симплексный режим используется в петлевых структурах.

Заметим, что рассмотренные способы и режимы передачи влияют на число интерфейсных линий. Например, восемь двунаправленных линий — это параллельно-последовательный (бит-параллельно, байт-последовательно) полудуплексный интерфейс.

В перспективных интерфейсах в основном применяют двунаправленные линии.

По принципу обмена информацией интерфейсы подразделяют на синхронные и асинхронные.

В синхронных интерфейсах задаются фиксированные циклы сообщений. Для фиксации циклов обычно используются синхросигналы, которые могут передаваться по отдельным линиям. При синхронном обмене все приемники информации должны иметь быстроедействие не ниже передатчика, который определяет темп выдачи единиц сообщений.

В асинхронных интерфейсах передатчик и приемник информации обмениваются сигналами о выдаче и приеме данных. В этом случае наличие дополнительных управляющих сигналов, передаваемых по специальным линиям, обязательно. Управляющие сигналы в асинхронной системе инициируются либо передатчиком, либо приемником в зависимости от этапа процесса приема-передачи информации. Обычно управ-

вляющий сигнал, сопровождающий данные на выходе передатчика, существует до момента подтверждения приемником факта приема данных. Цикл обмена здесь не является фиксированным. Асинхронный принцип находит наибольшее применение.

В соответствии с *функциональным назначением* различают следующие интерфейсы [27]: системные (машинные или ввода-вывода) интерфейсы ЭВМ; сосредоточенных магистральных мультипроцессорных систем; периферийного оборудования (общего назначения и специализированные); сетей передачи данных (стыки и протоколы); программно-управляемых модульных систем и приборов; локальных вычислительных сетей различных типов; распределенных систем общего назначения и управления; малых локальных сетей микроконтроллеров.

По конструктивному исполнению интерфейсы делят на следующие категории: межблочные, обеспечивающие взаимодействие компонентов на уровне автономного устройства, блока, стойки, шкафа; внутриблочные, обеспечивающие взаимодействие на уровне субблоков, модулей, плат; внутриплатные, обеспечивающие взаимодействие между интегральными схемами (СИС, БИС, СБИС); внутрикорпусные, обеспечивающие взаимодействие компонентов внутри СБИС.

Возможные средства конструктивной реализации указанных интерфейсов следующие: межблочная — многожильный, коаксиальный, волоконно-оптический кабель; внутриблочная — скрученная витая пара, печатные проводники платы; внутриплатная — печатные проводники платы; внутрикорпусная — микроэлектронные проводники.

15.3. Стандартные интерфейсы для измерительных систем

Многолетняя работа отечественных и зарубежных специалистов в области автоматизации вычислительных процессов и измерений привела к созданию большого количества стандартных интерфейсов.

Стандартный интерфейс — это совокупность унифицированных технических, программных и конструктивных средств, необходимых для реализации взаимодействия различных функциональных элементов в системах обработки информации при условиях, предписанных стандартом и направленных на обеспечение информационной, электрической и конструктивной совместимости указанных элементов.

Стандартизация интерфейсов проводится в рамках национальных и международных организаций, таких, как Международная организация по стандартизации (МОО, ISO); Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ, ССИТТ); Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC); Европейская ассоциация производителей вычислительных машин (ЕСМА); Европейский комитет стандартов по ядерной электронике (ЕСОНЕ), Американский национальный институт стандартов (АНИС, ANSI); Институт инженеров по электронике и радиоэлектронике (IEEE), США, и др.

Из множества существующих интерфейсов для приборно-модульных ИИС (АИС) наибольшее применение получили интерфейсы HP-IB (КОП), HP-IL, ИРПС, а для функционально-модульных ИИС — КАМАК, ЕВРОБАС, ФАСТБАС, VXI и др. Рассмотрим некоторые из указанных интерфейсов.

15.3.1. Стандартный интерфейс МЭК 625.1

Фирмой Hewlett-Packard (Хьюлетт-Пакард) был введен интерфейс под маркой HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus), который использовался для сопряжения приборов. Этот интерфейс был утвержден МЭК в качестве международного — МЭК 625.1. В дальнейшем он был стандартизован во многих странах мира. В России применение этого стандарта регламентирует ГОСТ 26.003-80, в США — это интерфейс IEEE-488. Данный интерфейс встречается также под названием GRIB (General Purpose Interface Bus) — интерфейсная шина общего пользования (канал общего пользования — КОП).

Интерфейс МЭК 625.1 достаточно полно описан в научно-технической и учебной литературе [27, 55]. Рассмотрим некоторые его особенности.

Типовая обобщенная структура ИИС, построенная на основе рассматриваемого интерфейса, представлена на рис. 15.3, где выделено три группы модулей: средства измерений (СИ); средства вычислительной техники (СВТ); вспомогательные устройства (ВУ). На рисунке показаны следующие агрегатные средства, соединенные с шиной КОП: устройство сопряжения УС с объектом измерения ОИ; коммутатор К; электронно-счетный частотомер Ч; осциллограф ОС; цифровой вольтметр В; гене-

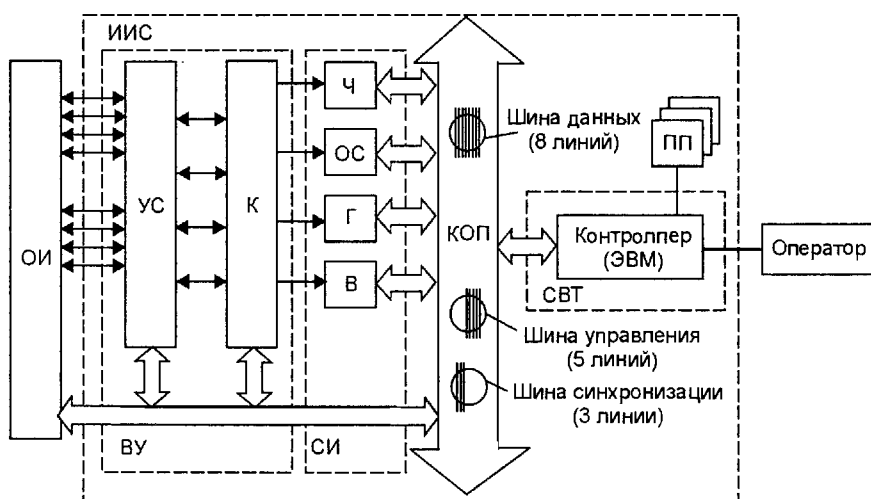


Рис. 15.3. Обобщенная структурная схема ИИС приборно-модульного типа

ратор сигналов Г и миниЭВМ, управляемая оператором и снабженная пакетом прикладных программ ПП.

Магистраль (шина) интерфейса КОП конструктивно представляет собой гибкий кабель, на концах которого имеются двусторонние разъемы с винтовыми зажимами (РПМ7-24). Каждый модуль имеет розетку, совместимую с разъемом магистрали (РПМ7-24Г-ПБ).

На розетке любого прибора разъемы могут наращиваться, что дает возможность наращивать и собирать структуры произвольной конфигурации, сохраняя общий магистральный способ соединения модулей.

Взаимосвязь модулей, выходящих на магистраль, показана на рис. 15.4. По отношению к магистрали все приборы равноправны. Модули подключаются к магистрали через интерфейсные приставки (интерфейсные модули, интерфейсные карты), обеспечивающие «перевод» информации с языка модулей на язык магистрали и наоборот.

Магистраль интерфейса состоит из 16 информационных линий, сгруппированных в три шины. Шина синхронизации (согласования данных) ШС предназначена для согласования работы источника и приемников при обмене информацией. Она состоит из трех линий, имеющих следующие наименования: сопровождение данных — СД (DAV); готов к приему — ГП (NRED); данные приняты — ДП (NDAC). В процессе синхронизации источник информации, убедившись, что приемник готов к приему (сигнал ГП), передает байт данных, сопровождая его сигналом СД. Приемник в свою очередь вначале выдает сигнал ГП, а затем сигнал ДП.

Шина управления ШУ содержит пять линий, имеющих следующие наименования и назначения одноименных сигналов:

- «управление» (УП) (ATN) — сигнал формируется контроллером и является признаком передачи по шине данных интерфейсного сообщения (команды или адреса);
- «конец передачи» (КП) (EOI) — по этой линии передается сигнал, который интерпретируется как окончание обмена;
- «запрос на обслуживание» (ЗО) (SRQ) — сигнализирует контроллеру о наличии запроса на обслуживание в системе;
- «очистить интерфейс» (ОИ) (IFC) — сигнал формируется контроллером и обеспечивает приведение интерфейса в исходное положение;
- «дистанционное управление» (ДУ) (REN) — сигнал формируется контроллером, блокирует ручное управление прибором и устанавливает управление прибором и управление от магистрали.

Шина данных (информационная шина) ШД содержит восемь линий, по которым осуществляется прием-передача информации. Основной единицей передачи информации в интерфейсе 625.1 является байт, состоящий из восьми двоичных символов. Линии номеруются ЛД0...ЛД7 (D101...D108). По информационным линиям, кроме информационных данных, передаются также интерфейсные сообщения, т.е. адреса

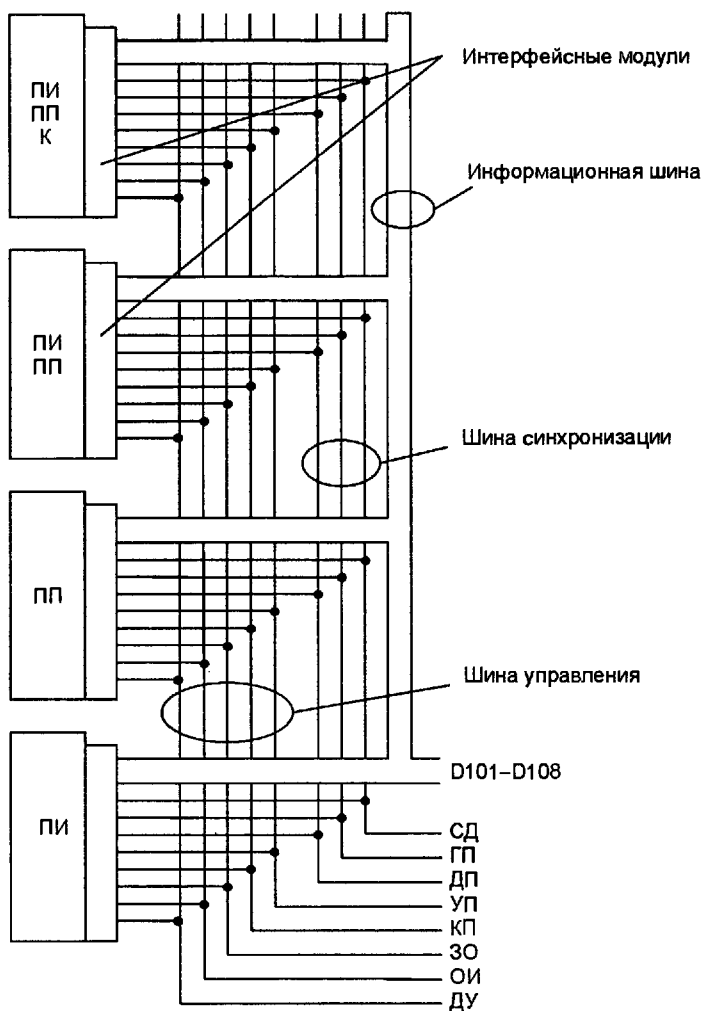


Рис. 15.4. Структура магистрали интерфейса МЭК 625.1

модулей и команды. По линиям ЛД0–ЛД4 передается адрес, присвоенный модулю, или код команды, а по ЛД5, ЛД6 — признак команды. Например, команда «запрет источнику передавать» имеет признак 10. Восьмой информационный символ ЛД8 используется для проверки на четность, что позволяет обнаруживать ошибку в пределах одного байта.

Общая протяженность магистрали в интерфейсе до 20 м, длина отдельного кабеля до 4 м. Однако следует заметить, что в некоторых модификациях НР-IV за счет использования вспомогательных устройств тока «повторитель шины» имеется возможность контролировать сигналы интерфейса на сотни метров по коаксиальному или волоконно-

оптическому кабелю или на неограниченное расстояние по телефонным и телеграфным каналам [8].

Максимальное число модулей в интерфейсе без использования дополнительных вспомогательных устройств равно 15. При использовании вспомогательных устройств их число может быть увеличено до 31 или 992.

Быстродействие интерфейса нормативно ограничено скоростью передачи 1 Мбайт/с. Эта цифра определяется электрическими параметрами кабеля, а также алгоритмом обмена данными между приемниками и источниками сигналов, подключенных к магистрали.

Передача команд и информации по информационной шине асинхронная и двусторонняя.

В интерфейсе предусмотрена отрицательная логика и уровни сигналов соответствуют уровням ТТЛ.

В общем случае управляющих модулей (ЭВМ) в интерфейсе может быть несколько, однако в каждый конкретный момент задачу управления решает всегда только один модуль, а в остальное время он является ведомым модулем, т.е. управление в интерфейсе не является распределенным. ЭВМ в интерфейсе командует всеми процессами. Она является и приемником информации, и источником, и контроллером. В соответствии с алгоритмом работы ИИС, задаваемым программой, ЭВМ выполняет одну из следующих трех функций: считывание результатов измерений с модулей приборов, передача команд на переключение режимов работы модулей, организация обмена между модулями. То есть ЭВМ определяет, какому модулю, когда и в какой последовательности быть источником или приемником, а также от кого получать и кому передавать информацию.

Все остальные модули интерфейса, кроме управляющего, в каждый конкретный момент времени являются источниками или приемниками. Основной режим работы этих модулей — постоянное сканирование линий магистрали. Если модуль обнаруживает информацию, предназначенную для него, то он вступает в работу и осуществляет прием или передачу информации. Типовой порядок работы пассивного (неуправляющего) модуля можно представить набором следующих основных функций: пассивное сканирование, обнаружение принадлежащей ему информации, ее прием и расшифровка, использование полученного задания, выдача в магистраль информации о завершении работы (запрос на обнаружение), пассивное сканирование до получения информации на поставленный вопрос, передача измеренных или других данных в ЭВМ.

Интерфейсом 625.1 предусмотрено десять интерфейсных функций, имеющих следующие наименования и назначения:

- «синхронизация передачи источника» (СИ) (SH) — передача команд и данных;
- «синхронизация приема» (СП) (AH) — прием команд и данных;

- «источник или источник с расширением» (И или ИР) (Т или ТЕ) — однобайтовая или двухбайтовая адресация, разделение на режимы передачи результатов измерений и данных о состоянии;
- «приемник или приемник с расширением» (П или ПР, Л или LE) — однобайтовая или двухбайтовая адресация модулей приемника;
- «запрос на обслуживание» (З) (SR) — организация выдачи и снятия запроса на обслуживание;
- «дистанционное местное управление» (ДМ) (RL) — порядок блокировки и деблокировки ручного управления модулями;
- «параллельный опрос» (ОП) (PP) — усложненный способ идентификации модулей, требующих обслуживания;
- «очистить устройство» (СБ) (DC) — установка всех или выбранных модулей в исходное состояние;
- «запуск устройства» (ЗП) (DT) — одновременное включение измерительных ресурсов модулей;
- «контроллер» (К) (C) — инициализация и правила командования магистралью, передача управления другой ЭВМ.

Описание каждой из десяти интерфейсных функций, а также схемы-диаграммы, поясняющие процедуру исполнения каждой функции, можно найти в специальной справочной литературе.

15.3.2. Стандартный интерфейс КАМАК

Интерфейс КАМАК представляет собой систему функционально-модульного типа. Основными конструктивными элементами КАМАК является крейт (кассетный блок). Каждый крейт имеет 25 ячеек для вставных функциональных модулей (рис. 15.5) [44]. Смежный модуль может занимать один или несколько ячеек крейта. Каждый модуль имеет интерфейсный узел сопряжения и соединения с магистралью крейта (горизонтальная связь) через 86-контактный разъем. Расположение модуля в крейте может быть любым, его адрес соответствует месту его расположения в крейте.

Модульность построения обеспечивает гибкость и возможность наращивания системы.

В системе КАМАК могут использоваться модули различного функционального назначения: измерительные модули, модули ввода-вывода цифровых данных (регистры, счетчики); модули управления (контроллеры); модули сопряжения с интерфейсными устройствами вычислительной техники, сервисные модули (генераторы, индикаторы, анализаторы и др.).

В интерфейсе крейта КАМАК предусмотрены два типа операций: безадресные (адресованные одновременно всем модулям) и адресованные.

В каждый момент времени взаимодействуют только два модуля — контроллер и один из его модулей. При этом происходит обмен либо

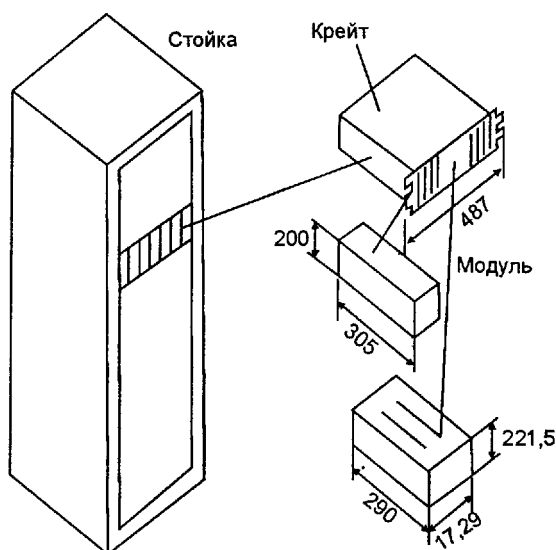


Рис. 15.5. Конструкция интерфейса КАМАК

управляющим сообщением (командой), либо информационным сообщением (данными). Обмен информацией параллельный. Основной способ ввода данных в систему КАМАК — централизованный по инициативе контроллера. Предусмотрен также централизованный ввод данных по инициативе функциональных блоков.

Некоторые модификации системы КАМАК, например КАМАК 6500 (МЭК 552, стандарт EUR 6500, ГОСТ 26.201,1-84), позволяют создавать многокрейтную систему на основе интерфейса параллельного обмена информацией (вертикальная магистраль).

В вертикальной ветви возможно объединять до семи крейтов, в каждом из которых размещается контроллер крейта. Интерфейс вертикальной магистрали является машинно-независимым асинхронным интерфейсом. Сопряжение системы с ЭВМ при параллельном обмене осуществляется драйвером (устройством управления), включенным в вертикальную магистраль.

Процесс передачи информации в вертикальной магистрали осуществляется по принципу квитирования, т.е. «запрос — ответ». Запуск системы осуществляется по единственному сигналу общего управления, поступающему на магистраль крейта. Контроллер крейта, получая соответствующий сигнал, транслирует его в свою магистраль и осуществляет синхронную связь с нужным модулем.

Системное обозначение и назначение шин и сигналов магистрали крейта и магистрали ветви можно найти в специальной литературе.

15.3.3. Стандартный интерфейс VXI

Интерфейс VXI разработан в 1980-е годы на базе интерфейса VME bus и является одним из перспективных самостоятельных интерфейсов для построения современных измерительных систем. Он получил широкое распространение в качестве базового для ИИС функционально-модульного типа. В зарубежных и отечественных информационных системах практикуется два подхода к построению VXI систем — это системы на базе внешнего компьютера и системы на основе встроенных компьютеров.

В конфигурациях первого типа в качестве управляющей ЭВМ используется внешний стандартный компьютер, к которому через системные интерфейсы подключаются крейты, соединенные с датчиками информации. В качестве системного интерфейса в данном случае могут использоваться последовательные интерфейсы (RS-232, RS-485), высокоскоростные параллельные интерфейсы (MXI, VXLlink), магистральные приборные интерфейсы (МЭК 625.1).

Применение того или иного из указанных интерфейсов определяет возможности VXI системы по скорости обмена информацией, по числу подключаемых крейтов, по удалению крейтов от компьютера (табл. 15.2).

VXI-системы второго типа, т.е. на основе встроенных в крейт компьютеров, являются более высокопроизводительными, обеспечивающими

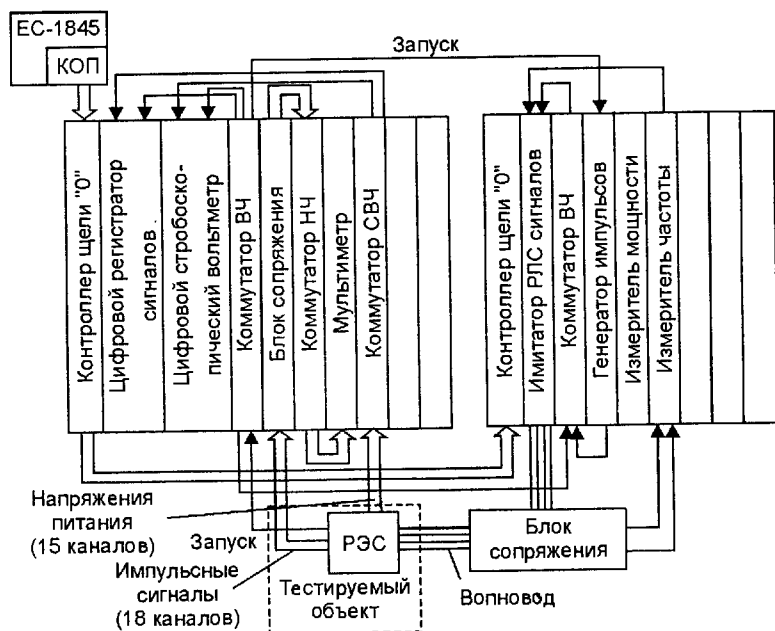


Рис. 15.6. Вариант реализации ИИС на основе интерфейса VXI

Таблица 15.2

Показатели VXI системы при использовании различных интерфейсов

Вид интерфейса	Скорость передачи информации	Число крейтов (без средств расширения)	Удаление крейтов от компьютера, м
RS-485	1200 Кбит/с	20	1000
МЭК 625.1	1000 Кбит/с	15	20
MXI	20 Мбит/с	8	20

ми скорость обработки информации в несколько десятков Мбайт/с. Встраиваемый компьютер в данном случае совмещает функции управляющей ЭВМ и командного модуля шины VXI.

Модули крейта VXI системы могут иметь размеры 233×340 мм или 367×340 мм. С помощью конструктивных адаптеров в крейте могут использоваться модули стандарта VME размером 233×160 мм и 100×160 мм, т.е. обеспечивается конструктивная возможность использования модулей интерфейса VME в крейтах VXI.

Одна из структурных схем реализации ИИС на базе интерфейса VXI, предназначенная для контроля достаточно сложной радиоэлектронной системы (РЭС), показана на рис. 15.6.

15.4. Виртуальные приборы и компьютерные измерительные системы

Одной из установившихся тенденций в области автоматизации измерений является внедрение в практику измерений виртуальных сред сбора и обработки информации. Это стало возможным благодаря интенсивному развитию современных информационных компьютерных технологий. Виртуальные среды позволяют создавать программные модули обработки данных, т.е. виртуальные приборы (инструменты), которые могут использоваться (при выполнении определенных условий) в практике измерений наравне с реальными приборами.

Практическим воплощением концепции виртуального инструмента стала среда разработки программ LabVIEW. Существенным отличием этой среды программирования от большинства существующих, где используются тестоориентированные языки, является использование в ней языка графического программирования. Кроме того, в LabVIEW имеется большая библиотека функций и процедур, универсальных для большинства прикладных задач управления средствами измерения, сбора и обработки данных. В целом LabVIEW вобрал в себя наиболее перспективные подходы и решения современной технологии автоматизации измерений.

Программы, созданные в среде LabVIEW, имеют три основные составные части: переднюю панель, блок-диаграмму и пиктограмму.

Передняя (лицевая панель) виртуального инструмента (ВИ) может содержать графическое изображение кнопок, клавиш, регуляторов и других органов управления и индикации. Конструирование лицевой панели в среде LabVIEW сводится к составлению картинки из различных

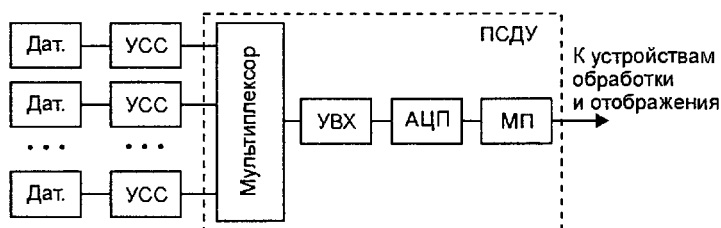


Рис. 15.7. Структура встраиваемой платы сбора данных

индикаторов и управляющих элементов, находящихся в меню. Управление системой осуществляется путем изменения положений переключателей, поворота ручек управления и введения значений с клавиатуры.

Блок-диаграмма представляет собой графическое решение задачи. Она составляется на графическом языке программирования. Затем встроенный в LabVIEW компилятор транслирует программу в машинный код. Функциональными блоками, выбираемыми из меню, могут быть блоки элементарных алгебраических операций, функции сбора и анализа данных, сетевые операции и др.

Пиктограмма является графическим представлением ВИ в блок-диаграмме. Пиктограмма позволяет «свернуть» ВИ в «объект», который можно использовать в блок-диаграммах других ВИ в качестве функций.

Аппаратная составляющая виртуальных измерительных приборов, обеспечивающая ввод реальных сигналов измерительной информации, может реализоваться в виде встраиваемых в компьютер сменных плат или в виде внешних устройств.

Сменная встраиваемая плата сбора данных и управления (ПСДУ) содержит обычно следующие основные элементы (рис. 15.7): мультиплексор, обеспечивающий параллельный ввод сигналов; устройство выборки и хранения УВХ; аналого-цифровой преобразователь АЦП; цифровой сигнальный микропроцессор МП. Обмен данными между ПСДУ и компьютером происходит либо через механизм прерываний, либо в режиме прямого доступа к памяти.

Информационный сигнал поступает с датчиков Дат. на ПСДУ через устройства согласования сигналов УСС, которые могут выполнять различные функции: усиление, питание датчиков, переключение реле, электрическую изоляцию, фильтрацию сигналов и др.

Внешние устройства сбора данных и управления (УСДУ) (рис. 15.8) начали разрабатывать и внедрять с появлением переносных портативных компьютеров. В таких устройствах преобразование сигнала в цифровую форму проводится несколькими полностью синхронизированными АЦП, реализованными обычно в виде единой матрицы логических элементов. Такие устройства наиболее удобны для использования в полевых условиях.

Таким образом, набор аппаратных и программных средств, добавленных к обычному компьютеру и образующие ВИ, можно рассма-

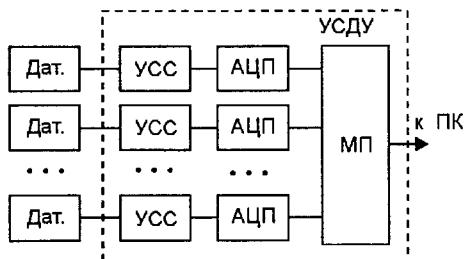


Рис. 15.8. Структура внешнего устройства сбора данных

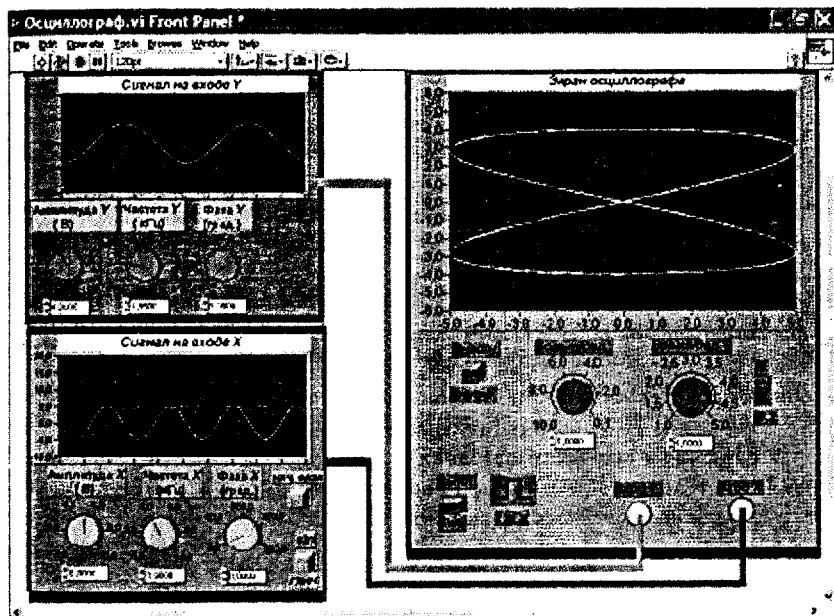


Рис. 15.9. Лицевая панель виртуального осциллографа

тривать как основу компьютерных измерительных технологий (КИС). Взаимодействие между отдельными элементами системы в КИС осуществляется с использованием внутренней шины персонального компьютера, а стандартные измерительные приборы могут заменяться виртуальными приборами.

Характерной особенностью КИС является их открытость. Так, при использовании среды программирования LabVIEW имеется возможность создавать ВИ, работающие с реальным сигналом не только через плату сбора данных, но и с функционально-модульными интерфейсами VXI, CAMAC, RS-232. Для работы с указанными интерфейсами используют приборные драйверы, т.е. программы, которые управляют отдельными приборами. LabVIEW имеет свою библиотеку приборных драй-

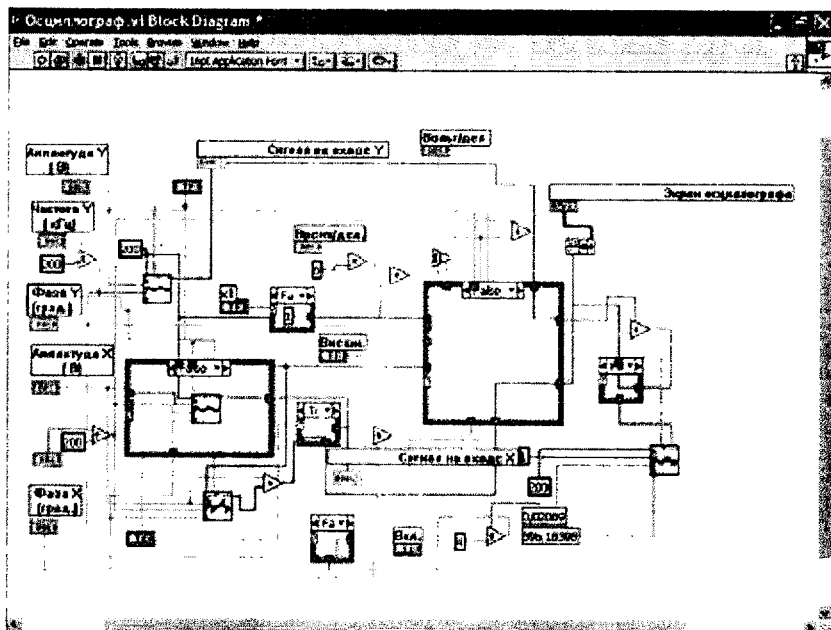


Рис. 15.10. Блок-диаграмма виртуального осциллографа

веров, но это не исключает возможность создания любых других необходимых драйверов.

В качестве примера на рис. 15.9 показана лицевая панель осциллографа, созданного в среде LabVIEW, а на рис. 15.10 представлена его блок-диаграмма.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимается под автоматизацией измерений?
2. Какие элементы цифровых измерительных приборов существенно расширяют возможности по автоматизации измерений?
3. Назовите основные виды измерительных систем.
4. Чем принципиально отличаются приборно-модульные измерительные системы от функционально-модульных?
5. По каким параметрам необходимо осуществлять совместимость модулей в информационно-измерительных системах?
6. Нарисуйте структуру интерфейса радиального типа.
7. Проведите классификацию измерительных интерфейсов.
8. Чем отличаются виртуальные измерительные приборы от реальных?
9. Какие аппаратные элементы необходимы для ввода реального сигнала в виртуальный прибор?
10. Назовите два подхода к построению VXI систем.
11. Назовите основной состав компьютерных измерительных систем.

ЧАСТЬ III

Основы квалиметрии, технического регулирования и стандартизации

Оценивание и поддержание качества продукции

16.1. Основные понятия, показатели и критерии, используемые при оценивании качества

В общем случае «качество» является фундаментальной философской категорией и как обобщенное понятие предполагает наличие существенных признаков, свойств, особенностей (атрибутов), отличающих друг от друга различные объекты, а также явления и процессы, происходящие в мире.

Фундаментальным системным понятием является также понятие «управление качеством», предполагающее совокупность постоянно действующих взаимосвязанных мероприятий, методов и средств, направленных на установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества объектов, явлений или процессов.

Понятия «качество», «оценивание качества» рассматривают в настоящее время в рамках самостоятельной науки — квалиметрии. *Квалиметрия* — это наука о количественном оценивании и анализе качества объектов.

В квалиметрии *качество* рассматривается как свойство или совокупность свойств объекта, обуславливающих его пригодность для использования по назначению.

С технико-экономических позиций принято рассматривать также понятие «качество продукции», охватывающее только те свойства, которые связаны с возможностью продукции удовлетворять определенные общественные или личные потребности.

С позиций оценивания качества промышленная продукция подразделяется на две группы: продукция, расходуемая при использовании (сырье, природное топливо, материалы, продукты, расходные изделия); продукция, расходующая свой ресурс (ремонтируемые и неремонтируемые изделия). В основу дальнейшего рассмотрения возьмем вторую группу продукции, куда входят и радиоэлектронные изделия различного назначения.

Свойство продукции — это объективная особенность продукции, проявляющаяся при ее создании, эксплуатации или потреблении.

Показатель качества продукции — это качественная характеристика одного или нескольких свойств, входящих в состав качества продукции, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания, эксплуатации или потребления.

По числу характеризующих свойств принято различать единичные и комплексные показатели.

Единичный показатель качества продукции — это показатель, характеризующий только одно из свойств продукции, а *комплексный показатель* — показатель, характеризующий несколько ее свойств. Разновидностью комплексного показателя качества (КПК) являются обобщенный, интегральный и групповой показатели качества.

Обобщенный КПК — это показатель, характеризующий такую совокупность свойств, по которым оценивается качество продукции.

Интегральный КПК характеризует отношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления продукции к суммарным затратам на ее создание, эксплуатацию или потребление.

Групповой КПК — это показатель, характеризующий одну группу свойств продукции.

Показатель качества продукции называют *определяющим*, если он используется для принятия решения при оценивании ее качества.

В целом структуру показателей качества объекта следует считать многоуровневой. На нижнем уровне находятся единичные показатели. Показатели качества следующего, более высокого уровня, являются комплексными показателями, отражающими качество определенной группы свойств объекта. На верхнем уровне может быть единый обобщенный комплексный показатель качества объекта, определяющий качество объекта в целом.

Комплексные показатели качества (КПК) могут быть связаны с единичными через функциональные зависимости, отражающие их объективные взаимосвязи. Так, примером комплексного показателя надежности радиоэлектронного изделия в установившемся режиме может служить коэффициент готовности K_r , отражающий свойства безотказности через наработку на отказ (T_o) и свойство ремонтпригодности через среднее время восстановления (T_b):

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}.$$

В случае, когда комплексный показатель качества выразить через единичные показатели с использованием объективных функциональных зависимостей не удастся, применяют субъективный способ образования комплексных показателей по принципу среднего взвешенного. В этом случае комплексный показатель качества K определяется как некоторая заданная функция оценок единичных показателей $y_1, y_2, \dots, y_n$ и весовых коэффициентов $a_1, a_2, \dots, a_n$:

$$K = f(y_1, y_2, \dots, y_n, a_1, a_2, \dots, a_n). \quad (16.1)$$

Таблица 16.1

Математические модели комплексных показателей качества

Наименование	Формула
Средневзвешенное арифметическое (СВА)	$K_{\text{СВА}} = \sum_{i=1}^n a_i y_i$
Средневзвешенное квадратическое (СВК)	$K_{\text{СВК}} = \sum_{i=1}^n a_i^2 y_i^2$
Средневзвешенное геометрическое (СВГм)	$K_{\text{СВГм}} = \prod_{i=1}^n y_i^{a_i}$
Средневзвешенное гармоническое (СВГр)	$K_{\text{СВГр}} = \sum_{i=1}^n a_i / \sum_{i=1}^n y_i / a_i$

С помощью весовых коэффициентов a_i учитывается важность каждого единичного показателя y_i . Весовые коэффициенты обычно определяются экспертным методом.

Используют следующие математические модели комплексных показателей качества: средневзвешенное арифметическое (СВА), средневзвешенное квадратическое (СВК), средневзвешенное геометрическое (СВГм), средневзвешенное гармоническое (СВГр). Аналитический вид указанных моделей представлен в табл. 16.1.

Математическая модель комплексного показателя качества должна выбираться в каждом конкретном случае. Неправильный ее выбор может привести к существенному завышению или занижению значения показателя качества.

По характеризующим свойствам продукции различают следующие показатели: назначения, надежности, экономические, эргономические, эстетические, технологические, транспортабельности, экологические, безопасности, стандартизации и унификации, патентно-правовые. Дадим им краткую характеристику.

Показатели назначения характеризуют свойства изделия, определяющие основные функции, для выполнения которых оно предназначено. Показатели назначения обычно регламентируются ГОСТами, ОСТАми и техническими условиями на изделие. Для радиоэлектронных изделий (средств связи) к показателям назначения можно отнести конструктивные показатели (габаритные размеры, массу), условия эксплуатации (температурный диапазон, влажность, устойчивость к механическим воздействиям) и др.

Показатели надежности характеризуют свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки на отказ. Указанные свойства характеризуются безотказностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью. Показатели

надежности находят широкое применение при оценке качества радиоэлектронных изделий в процессе их эксплуатации.

Экономические показатели (материалоемкость, трудоемкость, техническая себестоимость, цена изделия, эффект от эксплуатации) характеризуют свойства изделия, отражающие его техническое совершенство по уровню или степени потребляемых им сырья, материалов, топлива, трудовых ресурсов при эксплуатации.

Эргономические показатели определяют соответствие изделия эргономическим требованиям, предъявляемым к его размерам, форме, к взаимному расположению элементов конструкции и др., т.е. тем требованиям, которые определяют удобство работы человека с этим изделием. Эргономические показатели характеризуют систему «человек-изделие» и учитывают комплекс гигиенических, антропометрических, физиологических и психологических свойств человека, проявляющихся в процессе производства и эксплуатации.

Эстетические показатели характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, условность композиции, совершенство производственного исполнения изделия. Эстетические показатели рассматривают соответствие художественно-конструкторского решения функциональному назначению и инженерно-технической сущности изделия.

Показатели технологичности характеризуют степень эффективности принятых при разработке изделия конструктивно-технологических решений. К таким показателям относят совокупность свойств изделия, влияющих на затраты труда, средств, материалов и времени при технической подготовке и изготовлении изделия. Примером показателей технологичности являются удельный вес материалов и способов их обработки, удельный вес методов сборки и др.

Показатели транспортабельности характеризуют приспособленность изделия к транспортированию, не сопровождающемуся его использованием или потреблением. В качестве показателей транспортабельности могут выступать средняя продолжительность (средняя трудоемкость) подготовки изделия к транспортированию; средняя продолжительность установки изделия на средство транспортирования конкретного вида и др.

Экологические показатели характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации или потреблении продукции.

Показатели безопасности характеризуют особенности изделия, определяющие при его эксплуатации безопасность обслуживающего персонала.

Показатели стандартизации и унификации характеризуют насыщенность изделия стандартами, унифицированными и оригинальными составными частями, а также уровень унификации с другими изделиями.

Патентно-правовые показатели характеризуют степень обновления технических решений, используемых в изделии, их патентную защиту, а также возможность беспрепятственной реализации изделия в стране и за рубежом.

Единичные или комплексные показатели качества характеризуют уровень качества объекта относительно одного свойства объекта или совокупности его свойств, но окончательного решения о качестве исследуемого объекта они не дают. Действительно, что можно сказать о надежности объекта, если его коэффициент готовности $K_r = 0,9$? Высокая эта надежность или низкая? Для того чтобы ответить на этот вопрос, нужно, очевидно, ввести какой-то критерий оценивания.

Критерий оценивания качества — это руководящее правило, вытекающее из принятых концепций и принципов оценивания, реализуемое при принятии того или иного решения о качестве исследуемого объекта. Критерий — это отличительный признак, мерило оценивания.

При оценивании качества объекта, описываемого m -мерным векторным показателем, используют три класса критериев: критерии пригодности G , критерии оптимальности O , критерии превосходства S .

Рассмотрим математическую формулировку указанных критериев [45]. При этом будем использовать следующие обозначения: x_{ij} , $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$, — показатель j -го свойства i -го объекта, т.е. показатель качества i -го объекта есть вектор $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$; $x_{\text{доп}}$ — область допустимых значений показателя качества i -го объекта.

Критерий пригодности:

$$G: \bigcap_{j=1}^m (x_{ij} \in \{x_{\text{доп}}\}) = D, \quad (16.2)$$

где $\bigcap$ — булево пересечение событий (конъюнкция высказываний); D — достоверное событие (истинное высказывание).

По определению объекты, для которых выполняются условия (16.2), пригодны для использования по назначению. При этом все они обладают одинаковым качеством.

Критерий оптимальности:

$$O: \bigcap_{j=1}^m (x_{ij} \in \{x_{\text{доп}}\}) \bigcap \bigcap_{k \in \{k\}_L} (x_{kj} = x_{\text{копт}}) = D, \quad (16.3)$$

где $x_{\text{копт}}$ — оптимальное значение показателя k -го свойства; L — объем множества $\{k\}$ номеров оптимизируемых свойств. По определению объект, для которого выполняются условия (16.3), называется оптимальным по k -му свойству.

Критерий превосходства:

$$S: \bigcap_{j=1}^m \bigcap_{i=1}^n x_{ij} \in \{x_{\text{доп}}\} \bigcap \bigcap_{j=1}^m \bigcap_{i \neq 1}^n (x_{il} \geq x_{ij}) = D, \quad l = 1, \dots, m. \quad (16.4)$$

По определению объект, для которого выполняются условия (16.4), превосходит по качеству все остальные объекты.

Если

$$\bigcap_{j=1}^m (x_{ij} \in x_{ij}), \quad (16.5)$$

то качества l -го и i -го объектов признаются одинаково превосходными. Если же хотя бы одно из условий (16.4) не выполняется, то это означает, что заданная совокупность свойств не позволяет выявить объект, превосходящий по качеству остальные.

Следует заметить, что критерий превосходства является частным случаем критерия оптимальности, поскольку выражение (16.4) означает, что

$$\bigcap_{j=1}^m \bigcap_{i=1}^m (x_{j1} \geq x_{ji}) = \bigcap_{j=1}^m (x_{j1} = x_{iopt}),$$

т.е. превосходный объект оптимален по всем свойствам.

В свою очередь, критерий оптимальности является частным случаем критерия пригодности, поскольку выражение (16.3) означает, что

$$\{x_{kдоп}\} = \{x_{kopt}\}, \quad k \in \{k\}_L.$$

Следовательно, при оценивании качества критерий пригодности G может рассматриваться как доминирующий.

16.2. Методы определения показателей и оценивания уровня качества продукции

В теории и практике оценивания качества продукции используют различные методы определения показателей ее качества, которые можно разделить на две группы — эвристические и неэвристические.

Эвристические методы — это субъективные методы, в основе которых лежит сбор и обработка экспертных данных. Эти методы принято разделять по двум классификационным признакам [54]: в зависимости от характера информации, получаемой от экспертов, — органолептические и социологические методы; в зависимости от вида информации — экспертные методы, экспертно-статистические и методы эвристической классификации.

Органолептические методы определения показателей качества предполагают использование органов чувств экспертов — зрения, слуха, обоняния, осязания, вкуса. Эти методы распространены в медицине, пищевой и парфюмерной промышленности.

Социологические методы используют опросы населения или отдельных его социальных групп. Эти методы широко используют, например, при определении качества изделий широкого потребления.

Экспертные методы предполагают чаще всего использование экспертов для определения коэффициентов весомости единичных показателей качества.

Экспертно-статистические методы решают задачу определения показателей качества продукции на основе достаточно большой выборки объектов. На основе экспертного опроса строят математическую модель комплексного показателя качества для объектов определенного назначения, которая позволяет в дальнейшем находить комплексный показатель качества без очередного опроса экспертов.

Методы эвристической классификации заключаются в разбиении экспертами группы объектов на несколько классов. Объекты каждого класса имеют равные комплексные показатели, определенные в балльной системе. Полученные баллы и соответствующие им наборы значений единичных показателей используют для определения границ классов в пространстве единичных показателей.

Неэвристические методы определения показателей качества основаны на использовании выявленных взаимосвязях между параметрами продукции, ее индивидуальных показателей или других объективных данных об этих значениях. Это измерительный, регистрационный и расчетный методы.

Измерительный метод — это объективный метод определения показателей качества. Он является наиболее распространенным и реализуется на основе использования технических средств измерений.

Регистрационный метод осуществляется на основе наблюдений и подсчете числа определенных событий. Он широко используется при определении значений показателей надежности, например, наработки на отказ, среднего времени восстановления и др.

Расчетный (математический) метод реализуется на основе использования известных теоретических и эмпирических зависимостей показателей качества продукции от ее параметров. Под параметром здесь понимается признак продукции, количественно характеризующий любые ее свойства или состояния.

Приступая к рассмотрению методов оценивания качества продукции, отметим смысл понятий «оценивание» и «оценка» качества. *Оценивание качества* — это процедура принятия решения о качестве. *Оценка качества* — это числовая характеристика показателя качества, получаемая опытным путем или с помощью расчетов с использованием модели показателя качества.

Еще раз заметим, что получение количественной оценки показателя качества не является самоцелью. Конечная цель процесса оценивания состоит в выработке суждения об объекте, количественная характеристика (показатель) которого приняла определенное значение. Процесс оценивания обычно состоит из трех этапов. На первом этапе уточняется номенклатура показателей качества. На втором этапе определяются значения этих показателей. На третьем этапе проводится собственно оценивание по критерию пригодности, оптимальности или превосходства.

В зависимости от используемых для сравнения единичных или комплексных показателей качества выделяют два метода оценивания качества: дифференцированный и комплексный. При дифференцированном методе, применяемом в основном при оценивании главного качества, оцениваются единичные показатели объекта. При использовании комплексного метода, применяемого в большинстве случаев, оцениваются комплексные показатели качества. Комплексное оценивание качества можно рассматривать как двухэтапный процесс, включающий оценивание простых свойств и оценивание сложных свойств или качества объекта в целом.

В некоторых случаях используется так называемый смешанный метод оценивания качества. Он основан на совместном применении единичных и комплексных показателей качества и обычно применяется, когда комплексный показатель качества не достаточно полно учитывает все существенные свойства продукции.

В качестве примера рассмотрим особенности комплексного метода оценивания качества продукции на основе экспертного определения показателей качества. Алгоритм определения комплексного показателя качества промышленных и, в частности, радиоэлектронных изделий данным методом зависит от целей и задач, а также от точности оценивания. Известные обобщенные алгоритмы носят лишь рекомендательный характер. Вместе с тем в большинстве случаев при нахождении количественных значений комплексных показателей качества изделий приходится проводить следующие основные процедуры:

- выбор математической модели КПК;
- определение совокупности единичных показателей качества и их оценок;
- определение состава и проверка согласованности экспертов;
- ранжирование единичных показателей качества;
- определение оценок (значений) коэффициентов весомости.

При отсутствии объективных функциональных зависимостей, связывающих единичные показатели качества с комплексными показателями, задача выбора математической модели не является однозначной. Вместе с тем известны некоторые рекомендации практического характера позволяющие определить наиболее подходящую модель. Отметим некоторые рекомендации [30, 54].

КПК должен быть репрезентативным, т.е. должен учитывать все основные параметры, определяющие качество изделия. При этом должна быть предусмотрена возможность учета комплексным показателем коэффициента (множителя) «вето», принимающего значение равно нулю, когда хотя бы один из основных показателей качества недопустимо занижается или выходит за допустимые границы.

Изменение любого из выбранных индивидуальных показателей качества должно приводить к изменению КПК при фиксированных значениях остальных показателей, выбранных для комплексного оценивания,

Таблица 16.3

Единичные показатели качества

Единичные показатели качества	№ 1	№ 2	№ 3	Нормирующее изделие
P_1 — дальность связи, км	8	8	18	15
P_2 — диапазон частот, кГц	36...46,1	20...52	20...52	30...80
P_3 — шаг сетки частот, Гц	25	25	1	1
P_4 — масса, кг	14	16,9	18,5	5
P_5 — чувствительность, мВт	1,5	1,5	1,5	1,5
P_6 — наработка на отказ, час	2000	1000	2500	3000
P_7 — уровень побочного излучения, мВт	40	60	60	60
P_8 — элементная база	л	л	л/пп	мс

т.е. комплексный показатель должен обладать определенной индивидуальной чувствительностью.

Из приведенных в табл. 16.1 математических моделей наиболее универсальной считается средневзвешенная геометрическая. Средневзвешенную арифметическую модель рекомендуется использовать при объединении однородных показателей с небольшим разбросом, а средневзвешенную геометрическую — при большом разбросе показателей.

Совокупность (система) единичных показателей качества может быть задана или выбираться экспертами. При экспертном оценивании отдельные показатели могут быть исключены как незначимые или наоборот экспертами могут быть добавлены новые показатели. Процедура принятия решения о составе единичных показателей качества экспертами может быть открытой и закрытой.

Принципиально важным при комплексном оценивании качества изделий по комплексным показателям является правильное определение значений оценок ЕПК. Для решения этой задачи обычно выбирается некоторое гипотетическое нормирующее изделие, имеющее наилучшие значения ПК p_{iH} среди аналогов. Такое изделие иногда называют идеальным аналогом. Значения ЕПК y_i вычисляются как отношение показателя исследуемого изделия и аналогичного показателя изделия, принятого за нормирующее по формулам

$$y_i = p_i/p_{iH} \quad \text{или} \quad y_i = p_{iH}/p_i. \quad (16.6)$$

Пример. Единичные показатели качества радиостанций представлены в табл. 16.3. В этой же таблице представлены показатели качества радиостанции взятой в качестве нормирующей. Полученные оценки ЕПК на основе (16.6) представлены в табл. 16.4.

Показатель «диапазон частот» нормировался относительно средней частоты интервала, а показатель «элементная база» — присвоением коэффициентов: л (лампа) — 3; л/пп (лампа/полупроводник) — 5; пп — 6; пп/мс — 8; мс (микросхема) — 10.

При определении состава экспертной комиссии должны быть отобраны высококвалифицированные эксперты, способные принимать объективные решения. При необходимости может проводиться предварительное специальное обучение экспертов методике проведения экспертизы.

Таблица 16.4

Единичные показатели качества

Оценки единичных показателей качества	№ 1	№ 2	№ 3
P_1 — дальность связи, км	0,53	0,53	1,20
P_2 — диапазон частот, кГц	0,26	0,97	0,97
P_3 — шаг сетки частот, Гц	0,04	0,04	1,00
P_4 — масса, кг	0,36	0,29	0,27
P_5 — чувствительность, мВт	1,00	1,00	1,00
P_6 — наработка на отказ, час	0,67	0,33	0,83
P_7 — уровень побочного излучения, мВт	1,50	1,00	1,00
P_8 — элементная база	0,30	0,50	0,60

Оценивание качества эксперта может проводиться различными методами.

Показателем качества эксперта могут служить различные документы и данные, характеризующие его профессиональную деятельность: число публикаций по рассматриваемой проблематике; ученая степень; занимаемая должность и др.

В качестве показателя квалификации эксперта могут рассматриваться результаты его участия в аналогичных экспертизах. Количественно качество эксперта в данном случае может определяться отношением числа случаев, когда мнение эксперта совпало с результатами экспертизы, к общему числу экспертиз, в которых он участвовал.

Достаточно эффективным считается метод оценивания качества эксперта на основе непротиворечивости его суждений в процессе проведения экспертизы, например, методом парных совпадений. Для определения степени непротиворечивости выявляется число высказанных экспертом противоречивых суждений γ и максимально возможное число противоречивых суждений $\gamma_{\max}$. Коэффициент непротиворечивости суждений эксперта η определяется по формуле [30]

$$\eta = 1 - \gamma / \gamma_{\max}.$$

На заключительном этапе формирования комиссии находит применение также метод самооценивания или взаимооценивания. При этом методе каждый член предполагаемой экспертной комиссии за ограниченное время отвечает на вопросы анкеты и сравнивает их с правильными ответами. Сравнение результатов может быть возложено на членов аналитической группы по организации и проведению экспертизы.

Хорошо подобранная экспертная комиссия обычно работает согласованно. Степень согласованности — важный показатель проведения экспертизы. Согласованность мнений экспертов принято оценивать по коэффициенту конкордации W , позволяющему получить итоговую оценку, используя количественные оценки каждого эксперта в отдельности при оценивании определенного набора факторов:

$$W = \frac{12S}{N^2(n^3 - n)} \quad (16.7)$$

$y_{10} = 10$; $y_{11} = 7$; $y_{12} = 9$. Проверим мнение пятого эксперта, который выставил максимальную оценку:

$$\beta_{\max} = \frac{y_5 - \bar{y}}{\sigma},$$

где $\bar{y}$ — среднее арифметическое значение оценки; σ — среднее квадратическое отклонение индивидуальных оценок.

В результате расчета получаем $\beta_{\max} = 0,42$. С вероятностью $P_d = 0,95$ из приложения 3 находим $\beta_\alpha = 2,29$. Имеем $\beta_{\max} < \beta_\alpha$, т.е. оценка, выставленная пятым экспертом, не противоречит мнению комиссии.

Для того чтобы убедиться, что согласованность экспертов, определяемая по коэффициенту конкордации, не является случайной, проводится оценивание значимости W по критерию χ^2 (хи-квадрат). Значение χ^2 выбирают из специальных таблиц в зависимости от принятой доверительной вероятности и числа степеней свободы $\gamma = i - 1$, а значимость коэффициента конкордации определяется неравенством:

$$(n - 1)NW > \chi^2. \quad (16.9)$$

пример. Определить согласованность экспертов для $n = 5$; $N = 7$ и $W = 0,59$ (см. ранее рассмотренный пример). Для случая $P_d = 0,95$ результатом расчета по формуле (16.9) и данным таблицы χ^2 имеем $16,52 > 9,488$, т.е. согласованность экспертов не является случайной.

Одной из распространенных задач, решаемых экспертами, является задача ранжирования объектов. Экспертное ранжирование представляет собой процедуру расстановки объектов оценивания в порядке предпочтения на основе одного или нескольких показателей сравнения. Ранжирование объектов проводится по шкале порядка.

В зависимости от вида отношений между объектами возможны два варианта упорядочения.

Первый вариант — когда среди объектов нет одинаковых (эквивалентных) по сравниваемым показателям. В этом случае между объектами существует отношение строгого порядка

$$a_1 > a_2 > \dots > a_n,$$

т.е. объект с первым номером является наиболее предпочтительным из всех n объектов. Упорядочению объектов соответствует упорядочение чисел $x_1 > x_2 > \dots > x_n$. Возможна и обратная последовательность $x_1 < \dots < x_n$. Числа $x_1, \dots, x_n$ в этом случае называются рангами и обозначаются буквами $r_1, r_2, \dots, r_n$.

Второй вариант — когда кроме отношений строгого порядка между объектами имеется отношение эквивалентности.

В данном случае для отношений строгого порядка наиболее предпочтительному объекту присваивается ранг, равный единице, второму — ранг, равный двум, и т.д., а для эквивалентных объектов назначаются одинаковые ранги. Так, например, $r_2 = r_3 = r_4 = (2 + 3 + 4)/3 = 3$ или $r_9 = r_{10} = (9 + 10)/2 = 9,5$. Одинаковые ранги, равные среднему арифметическому значению, называются связными рангами.

При групповом экспертном ранжировании каждый s -й эксперт присваивает каждому i -му объекту ранг r_{is} . В результате экспертизы получается матрица $\|r_{is}\|$ размерности $N \times K$, где N — число экспертов, K — число объектов, $s = \overline{1, N}$, $i = \overline{1, K}$.

Если ранжирование объектов осуществляется одним экспертом, то матрица имеет аналогичный вид, но вместо экспертов в соответствующих графах указываются показатели.

Процедура ранжирования объектов может быть проведена методом последовательного, попарного или множественного сопоставления.

Экспертный метод последовательного сопоставления предполагает последовательную корректировку оценок, указанных экспертами.

Порядок последовательного сопоставления может быть представлен следующим образом [58].

1. Проводится ранжирование, т.е. объекты располагаются в порядке их предпочтения. Эксперт указывает предпочтительные числовые оценки $\varphi(a_i)$ для каждого объекта. Наиболее предпочтительному объекту обычно приписывается оценка 1, а всем остальным от 1 до 0 в порядке уменьшения их относительной значимости.

2. Первый объект сопоставляется с совокупностью всех остальных. Если a_1 предпочтительнее, то эксперт корректирует оценку так, чтобы

$$\varphi(a_1) > \sum_{i=2}^n \varphi(a_i).$$

В противном случае оценка (результат измерения или весовой коэффициент) первого объекта корректируется в сторону уменьшения так, чтобы она оказалась меньше суммы остальных объектов:

$$\varphi(a_1) \leq \sum_{i=2}^n \varphi(a_i).$$

3. Сопоставляется второй объект с совокупностью всех остальных, стоящих ниже рангом. Процедура сопоставления аналогична рассмотренной в п. 2. Процесс сопоставления далее продолжается до последнего объекта.

4. Полученные оценки нормируются, т.е. делятся на общую сумму оценок. Они принимают значения от 0 до 1, а их сумма равна 1.

Экспертный метод последовательного сопоставления успешно применяется при измерениях по шкале отношений. В этом случае определяется наиболее предпочтительная (максимальная) оценка. Для всех остальных оценок эксперт указывает, во сколько раз они менее предпочтительны, чем максимальная.

Экспертный метод парного сопоставления представляет собой процедуру установления предпочтения объектов при сравнении всех возможных пар.

Парное сопоставление является измерением в порядковой шкале. В результате сравнения пары объектов a_i и a_j эксперт высказывает одно из трех возможных суждений: $a_i > a_j$; $a_j > a_i$; $a_i \approx a_j$. Этим суждениям соответствуют числовые представления $\varphi(a_i)$; $\varphi(a_i) > \varphi(a_j)$; $\varphi(a_j) > \varphi(a_i)$; $\varphi(a_i) = \varphi(a_j)$.

Результаты сравнения всех пар объектов принято представлять в виде матрицы. Числа, заполняющие матрицу, могут быть получены по одному из следующих трех правил [56]:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i \geq a_j; \\ 0, & \text{если } a_i < a_j; \end{cases} \quad (16.10)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{если } a_i \geq a_j; \\ 1, & \text{если } a_i \approx a_j; \\ 0, & \text{если } a_i < a_j; \end{cases} \quad (16.11)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{если } a_i \geq a_j; \\ 0, & \text{если } a_i \approx a_j; \\ -1, & \text{если } a_i < a_j. \end{cases} \quad (16.12)$$

Если сравнение пар объектов осуществляет группа экспертов, то каждый эксперт составляет свою таблицу результатов парных сравнений.

Следует отметить, что сравнение всех возможных пар не дает полного упорядочения объектов, поэтому, если целью экспертизы при определении сравнительной предпочтительности объектов является получение ранжирования или частичного упорядочения, необходима их дополнительная идентификация.

Экспертный метод множественного сравнения отличается от метода парного сравнения тем, что экспертами устанавливаются предпочтения не между парами объектов, а между тройками, четверками и т.д.

Пример. Оценки пяти измерительных приборов, полученные по правилу (16.10) метода Парного сопоставления экспертом, представлены в табл. 16.6, в которой предпочтение качества i -го прибора над j -м отмечено символом «1».

Результаты суммирования по каждой строке позволяют составлять ранжированный ряд оценок качества измерительных приборов

$$y_3 > y_1 > y_2 > y_5 > y_4.$$

Узловым вопросом комплексного оценивания качества является определение значений весовых коэффициентов a_i единичных показателей

Таблица 16.6

Результаты попарного сопоставления

i	j					Всего
	1	2	3	4	5	
1	—	1	0	1	1	3
2	0	—	0	1	1	2
3	1	1	—	1	1	4
4	0	0	0	—	0	0
5	0	0	0	1	—	1

качества. Весовые коэффициенты выбираются обычно в виде положительных и нормированных величин, т.е. сумма весовых коэффициентов всех n ЕПК принимается равной постоянной величине (обычно равной 1, 10, 100).

Количественные значения весовых коэффициентов можно получить на основе результатов ранжирования или провести их непосредственный расчет.

В первом случае после ранжирования объектов оценивания значение i -го коэффициента весомости определяется с использованием полученных значений r_{ij} :

$$a_i = \frac{\sum_j^N r_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N r_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16.13)$$

Экспертный метод непосредственного оценивания ЕПК заключается в определении значений показателей качества непосредственно в установленных единицах. Такое оценивание может проводиться по шкале интервалов или шкале порядка. Процесс оценивания начинается с расстановки объектов в порядке убывания их важности. При этом показателю, стоящему на первом месте, присваивается максимальная весомость, а показателю, стоящему на последнем месте, — минимальная весомость.

Промежуточные значения показателей определяют эксперты, сравнивая их между собой. В результате каждый j -й эксперт делает следующую расстановку показателей:

$$a_{\max} \geq a_2 \geq \dots \geq a_i \geq \dots \geq a_{n-1} \geq a_{\min}.$$

Коэффициенты весомости рассчитывают на основе оценок, полученных j -м экспертом для i -го коэффициента весомости a_{ij} :

$$a_i = \frac{\sum_j^N a_{ij}}{\sum_i^n \sum_j^N a_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16.14)$$

Пример. Мнения шести экспертов о десяти ЕПК изделия представлены в табл. 16.7. Построить ранжированный ряд ЕПК и определить весовые коэффициенты.

Суммируя ранги для каждого ЕПК имеем

$$P_3 < P_1 < P_4 < P_5 < P_2 < P_8 < P_9 < P_6 < P_{10} < P_7.$$

В соответствии с (16.3) находим

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,036; & a_2 &= 0,093; & a_3 &= 0,023; & a_4 &= 0,070; & a_5 &= 0,076; \\ a_6 &= 0,146; & a_7 &= 0,163; & a_8 &= 0,016; & a_9 &= 0,120; & a_{10} &= 0,153. \end{aligned}$$

Таблица 16.7

Результаты работы экспертов

ЕПК	Результаты ранжирования ЕПК экспертом						Сумма рангов
	1	2	3	4	5	6	
P_1	2	2	1	3	1	2	11
P_2	5	7	1	2	3	10	28
P_3	1	1	1	1	2	1	7
P_4	3	3	2	4	5	4	21
P_5	7	5	2	5	4	3	23
P_6	8	8	5	7	8	8	44
P_7	9	9	5	8	9	9	49
P_8	6	6	4	6	7	6	35
P_9	7	4	2	10	6	7	36
P_{10}	10	10	3	9	10	5	46

16.3. Оценивание и поддержание качества продукции на стадии ее эксплуатации

Качество изделия устанавливается при проектировании, проектное требование по качеству реализуется при изготовлении и поддерживается, а при необходимости и восстанавливается, при эксплуатации. Следовательно, систему управления качеством можно рассматривать как комплексную систему, реализующуюся на трех последовательных стадиях: проектирование, производство, эксплуатация.

На стадии проектирования задача управления качеством состоит в установлении по совокупности показателей качества необходимого уровня качества изделия и в создании нормативно-технической документации (НТД), являющейся основой для обеспечения качества в процессе производства.

Установление уровня качества — это сложная противоречивая задача, которая решается последовательно при подготовке технического задания на изделие (ТЗ), при разработке технического проекта (ТП) и уточняется во время опытных конструкторских работ (ОКР) (рис. 16.1).

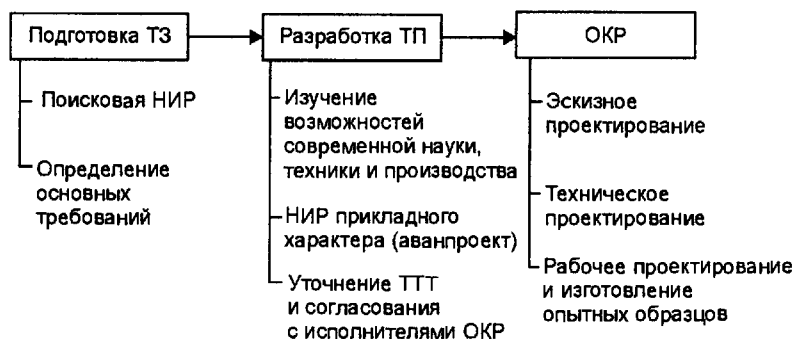


Рис. 16.1. Содержание основных работ на стадии проектирования

Во время поисковой НИР и аванпроекта рассматривают возможные альтернативные варианты изделия и оценивают их реализуемость. Установленные показатели качества оформляют в виде тактико-технических требований (ТТТ) к изделию, которые в дальнейшем уточняют и согласовывают с исполнителями ОКР.

При проведении ОКР, предусматривающих обычно эскизное, техническое и рабочее проектирование, решение по обеспечению номинального уровня качества принимается на основании расчетов и специальных испытаний. При этом на стадии эскизного проектирования проводится ориентировочная оценка показателей качества; при техническом проектировании эта оценка уточняется; проверка и оценка показателей уровня качества проводятся по результатам рабочего проектирования.

На этапе проектирования для обеспечения номинальных показателей качества РЭИ обычно проводят следующие виды работ: оптимизацию электрических схем по количеству и режиму работы радиоэлектронных элементов; повышение устойчивости схем к изменению параметров элементов; создание средств диагностирования, прогнозирования и контроля работоспособности; повышение удельного веса унифицированных элементов и блоков; обеспечение доступности к элементам для контроля и замены; оптимизацию количества контрольных точек и другие работы.

В процессе проектирования приходится учитывать, что требования к показателям качества в ряде случаев оказываются противоречивыми как между собой, так и между одноименными показателями на различных этапах жизненного цикла РЭИ. Так, например, технико-экономические показатели, и в частности показатели надежности и экономические показатели качества, на этапе производства и при эксплуатации одних и тех же РЭИ являются противоречивыми. Стоимость, затраченная на производство изделия, возрастает с увеличением требований по надежности, а стоимость эксплуатации при возрастании показателей надежности, как правило, снижается, так как более надежные изделия требуют меньших эксплуатационных затрат. В таких случаях на этапе проектирования задача состоит в определении такого значения показателя надежности Π_n (например, вероятности безотказной работы P), при котором экономический показатель Π_Σ достигает минимальной величины.

При ее решении следует исходить из суммарного значения экономического показателя Π , связанного с производством Π_n и эксплуатацией $\Pi_{\text{экс}}$ (рис. 16.2): $\Pi_\Sigma = \Pi_n + \Pi_{\text{экс}}$. Получаемый путем суммирования экономический показатель имеет минимум, которому соответствует оптимальное значение показателя надежности.

На стадии изготовления задача управления качеством изделия сводится к обеспечению уровня качества, установленного при проектировании и отраженного в НТД. Успешная реализация этой задачи определяется рядом факторов: качеством применяемых технологических процессов, технической оснащенностью производства, качеством поставляемых материалов и комплектующих изделий, уровнем организации и культу-

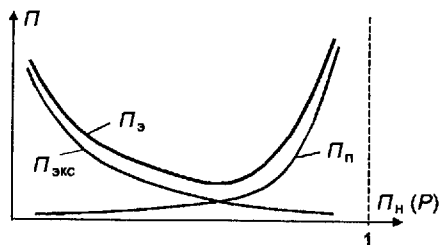


Рис. 16.2. Определение оптимального значения показателя качества на стадии проектирования

рой производства, обеспеченностью кадрами и их квалификацией, качеством контроля изделий и др.

Объектом управления в системе управления качеством являются условия и факторы процессов производства и испытаний изделий, а средствами управления или управляющими воздействиями — весь арсенал административных, технических и экономических рычагов, применяемых на всех уровнях управления.

Вопросу управления качеством РЭИ в процессе их производства посвящены работы ряда отечественных ученых и специалистов, например [11, 12]. Более подробно остановимся на анализе стадии эксплуатации РЭИ.

На стадии эксплуатации управление качеством изделий обычно отождествляется с управлением их техническим состоянием.

Под техническим состоянием (ТС) изделия понимается совокупность подверженных изменению в процессе эксплуатации свойств изделия, характеризующихся в определенные моменты времени признаками, установленными в технической документации на это изделие.

Как следует из определения, по своей сущности понятие «техническое состояние изделия» тесно связано с понятием «качество изделия», раскрывает его сущность и конкретизирует применительно к условиям эксплуатации. Поэтому в последующем изложении будем использовать термин «техническое состояние изделия» или «состояние изделия».

Принято выделять две пары взаимно противоположных состояний: исправное — неисправное, работоспособное — неработоспособное и предельное состояние.

Исправное — это состояние РЭИ, при котором оно должно соответствовать всем требованиям НТД и (или) конструкторской документации. Если хотя бы одно из требований НТД не выполняется, то РЭИ переводится в неисправное состояние.

Работоспособное — это состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, должны соответствовать требованиям НТД. РЭИ оказывается неработоспособным, если хотя бы один из его параметров по результатам контроля не соответствует нормам.

Предельным называется состояние, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Предельное состояние устанавливается обычно по критериям физического и (или) морального износа изделий, определяющим необходимость проведения средних и капитальных ремонтов или списания.

Исходя из рассмотрения сущности состояний РЭИ следует, что задача управления техническим состоянием может рассматриваться как задача обеспечения максимального времени пребывания изделия в работоспособном (исправном) состоянии и в обеспечении максимального времени до его перехода в предельное состояние.

Система управления техническим состоянием РЭИ имеет признаки, присущие любой системе управления. Наиболее существенным является наличие организационной основы структуры управления, стратегии управления, полноты процесса управления и системотехнического подхода к построению структуры управления. Указанные признаки имеют много общего с аналогичными признаками системы управления на стадии производства, вместе с тем, имеются и существенные особенности. Рассмотрим их.

1. Наличие организационной основы. Организационной основой управления техническим состоянием РЭИ являются техническое обслуживание и ремонт, объединенные общей организационной системой технического обслуживания и ремонта (СТОР) (рис. 16.3).

В системе эксплуатации РЭИ выделяются три функционально самостоятельных подсистемы: использования РЭИ по назначению; технической эксплуатации; организации обеспечения использования РЭИ по назначению и обеспечения технической эксплуатации. Из всех мероприятий технической эксплуатации техническое обслуживание и ремонт оказывают наибольшее влияние на качество функционирования РЭИ. Они являются наиболее оперативными элементами управления качеством РЭИ.

Под техническим обслуживанием (ТО) понимается комплекс операций по поддержанию РЭИ в работоспособном или исправном состоянии, а под ремонтом — комплекс работ по восстановлению исправности или работоспособности.

Таким образом, СТОР как организационная основа управления техническим состоянием представляет собой совокупность объектов ТО (РЭИ), обслуживающего их персонала и органов управления и обеспечения процесса эксплуатации, которые взаимодействуют между собой с целью поддержания РЭИ в работоспособном или исправном состоянии.

2. Наличие стратегии управления техническим состоянием РЭИ. Стратегия управления ТС РЭИ является основополагающим понятием, под которым обычно понимается совокупность правил управления.

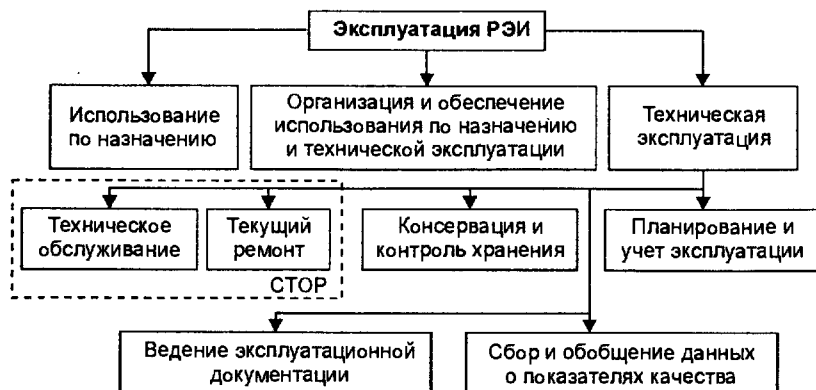


Рис. 16.3. Содержание эксплуатации РЭА

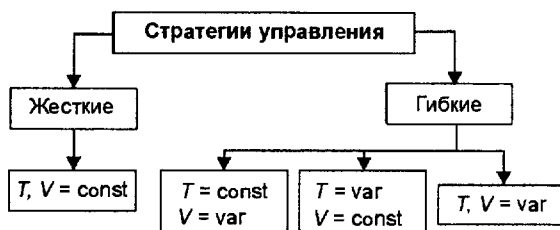


Рис. 16.4. Стратегии управления

Различают жесткие и гибкие стратегии управления (рис. 16.4). Жесткие стратегии управления предполагают фиксированный объем работ (V) и периодичность управляющего воздействия (T). При использовании гибких стратегий могут изменяться как сроки реализации управляющих воздействий, так и объем выполняемых работ.

Стратегию управления в общем случае можно рассматривать как стохастический управляемый процесс с дискретным временем, определяемый тремя составляющими:

$$G = \langle U, \Phi, T \rangle,$$

где $U = \{U_1, U_2, \dots, U_r\}$ — пространство управлений, реализуемых в моменты t_n ; $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots\}$ — последовательность правил, определяющих процесс управления; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n, \dots\}$ — временная последовательность управляющих воздействий.

Если состояние РЭИ описывается случайным вектором Y , а его эволюция во времени — случайной последовательностью $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)$, где $t_1, t_2, \dots, t_n$ — дискретные моменты времени, то динамика управляемого процесса описывается уравнением движения

$$y(t_{n+1}) = f[y(t_n), U(t_n)].$$

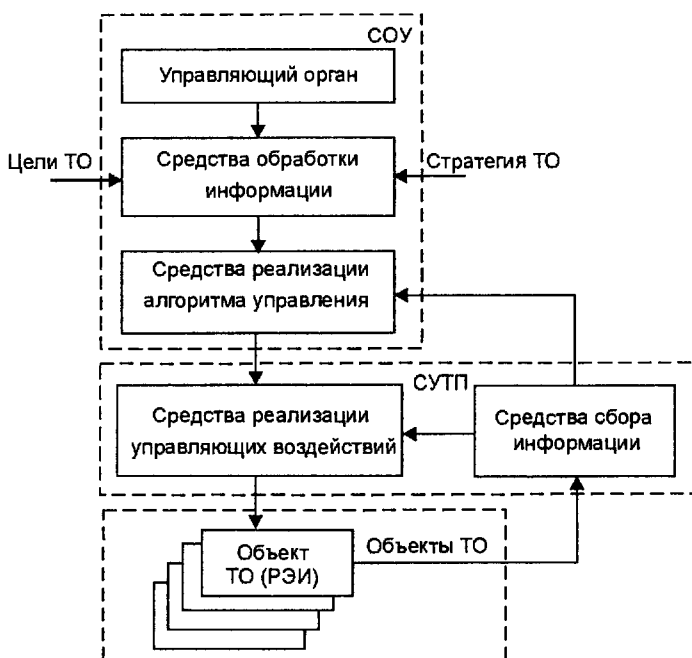


Рис. 16.5. Алгоритм функционирования системы технического обслуживания

3. Системотехнический подход при управлении техническим состоянием, как и при управлении качеством на этапе производства, предполагает наличие управляющей и управляемой систем, взаимодействующих между собой.

На верхнем уровне, как правило, находится подсистема организационного управления (COU). Она обеспечивает сбор и обработку информации, необходимой для управления параметрами СТОР с целью наиболее эффективного ее использования.

Нижний уровень представляет подсистема управления технологическим процессом технического обслуживания и текущего ремонта (СУТП). Ее целевое назначение — сбор и обработка информации, необходимой непосредственно для управления техническим состоянием РЭИ. Алгоритм функционирования системы управления техническим состоянием РЭИ последовательно решает три основные задачи: сбор информации; целенаправленную переработку этой информации; выдачу управляющих воздействий на объект управления (рис. 16.5).

В соответствии с целями технического обслуживания и принятой стратегией в COU формируется алгоритм управления и определяются оптимальные параметры СТОР (объем, периодичность). В СУТП определяется вид управляющего воздействия, реализуемый, как правило, человеком.

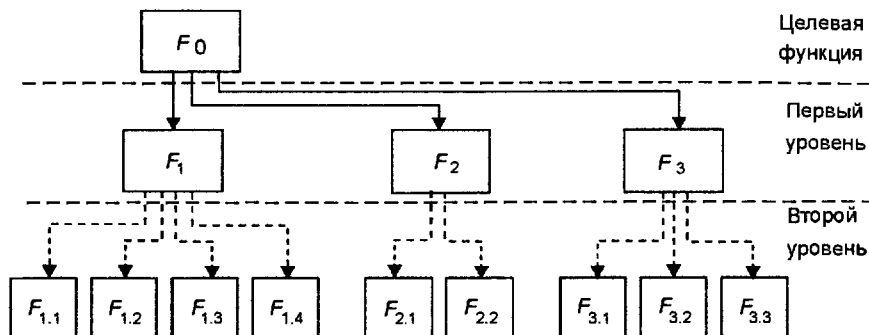


Рис. 16.6. Дерево функций процесса управления

4. Полнота процесса управления предполагает контроль управления факторами, влияющими на техническое состояние РЭИ.

В рамках СТОР полноту процесса управления можно охарактеризовать деревом функций, состоящим из целевой функции и функций двух основных уровней (рис. 16.6).

Функции F_i , показанные на рисунке, имеют следующие значения:

F_0 — целевая функция;

F_1 — планирование;

F_2 — контроль;

F_3 — восстановление технического состояния;

$F_{1.1}$ — планирование видов и объемов работ на ТО и ремонт;

$F_{1.2}$ — планирование трудозатрат на ТО и ремонт;

$F_{1.3}$ — планирование запасов;

$F_{1.4}$ — планирование необходимого оборудования для ТО и ремонта;

$F_{2.1}$ — съем информации о состоянии РЭИ;

$F_{2.2}$ — накопление и обработка информации о состоянии РЭИ;

$F_{3.1}$ — диагностика;

$F_{3.2}$ — устранение отказов;

$F_{3.3}$ — доведение параметров и характеристик до нормы.

Эффективность реализации целевой функции определяется качеством реализации всех составляющих, т.е.

$$F_0 = f(F_1, F_2, F_3).$$

Цель системы управления — обеспечение требуемой готовности РЭИ за счет сокращения длительности простоев на ТО и ремонт при минимизации расхода ресурса.

В соответствии с указанной целью в качестве критерия, определяющего полноту процесса управления, может быть использован комплексный критерий типа «стоимость-готовность»:

$$K(t) = \{C(t), K_{\text{ор}}(t)\},$$

где $C(t)$ — суммарные затраты на контроль, техническое обслуживание и ремонт РЭИ; $K_{ог}(t)$ — нестационарный коэффициент оперативной готовности, характеризующей надежность РЭИ в процессе их эксплуатации с учетом восстановления.

При исследовании системы управления ТС РЭИ, как и при любом исследовании, возникает задача построения модели исследуемого явления.

В качестве примера рассмотрим вероятностную модель управления состоянием РЭИ, полагая при этом, что в частном случае объектом управления может быть средство измерений.

При рассмотрении вопроса будем учитывать следующие ограничения:

- техническое состояние РЭИ полностью характеризуется одним параметром (для средства измерений это может быть одна из метрологических характеристик, например, погрешность);
- параметр подвержен случайному изменению (дрейфу) во времени; характер этого изменения монотонный, и в общем случае может быть как односторонним, так и двусторонним.

Конечной задачей будем считать определение закона распределения времени до выхода параметра за границы рабочей области при линейной модели дрейфа параметра.

С учетом ограничений событие, заключающееся в достижении некоторым параметром своего граничного значения, будем считать случайным, а значение параметра $\Pi(t)$ при его возможном двухстороннем дрейфе будем считать нормальным, если в течение заданного времени T_3 оно находится в допустимых пределах $\Pi_a - \Pi_b$, т.е.

$$\Pi_a \leq \Pi(t) \leq \Pi_b; \quad 0 \leq t \leq T_3. \quad (16.15)$$

О вероятности выполнения условия (16.15) следует говорить как о вероятности, зависящей как от времени, так и от предельных допустимых значений параметра:

$$P(\Pi_a, \Pi_b, t) = P\{\Pi_a \leq \Pi(t) \leq \Pi_b; 0, \dots, T_3\}.$$

При одностороннем предельном допуске на дрейф параметра вероятность нахождения параметра в заданных пределах будет определяться следующими равенствами:

для одностороннего нижнего допуска

$$P(\Pi_a, t) = P\{\Pi_a \leq \Pi(t); 0, \dots, T_3\}. \quad (16.16)$$

для одностороннего верхнего допуска

$$P(\Pi_b, t) = P\{\Pi_b \geq \Pi(t); 0, \dots, T_3\}. \quad (16.17)$$

Известно, что монотонные медленные изменения параметров $\Pi(t)$ различных явлений и процессов, в том числе и параметров РЭИ, могут

быть описаны уравнением следующего вида:

$$\frac{d\Pi(t)}{dt} = -kF. \quad (16.18)$$

где $\Pi(t)$ — определяющий параметр; k — коэффициент пропорциональности, зависящий от интенсивности изменения параметра; $F(\Pi)$ — функция, характеризующая процесс изменения определяющего параметра.

Используя (16.18), найдем $F(\Pi)$. При этом рассмотрим наиболее типичный случай, когда $\Pi(t)$ описывается линейной функцией.

Для линейной модели дрейфа:

$$\frac{d(\Pi_0 - \alpha t)}{dt} = -kF; \quad F = \frac{\alpha}{k} = \text{const}. \quad (16.19)$$

От уравнения (16.19) перейдем к уравнению, связывающему значение параметра в текущий момент времени с предельным значением параметра $\Pi_{\text{пр}}$ и временем $T_{\text{пр}}$ достижения параметром предельного значения. При этом будем иметь в виду, что каждому предельному значению параметра $\Pi_{\text{пр}}$ соответствует момент достижения параметром $\Pi(t)$ этого предельного значения $T_{\text{пр}}$:

$$\Pi(T_{\text{пр}}) = \Pi_{\text{пр}}. \quad (16.20)$$

Для этого решим уравнение (16.19) относительно $\Pi(t)$ с учетом (16.20).

Для линейной модели дрейфа:

$$\frac{d\Pi(t)}{dt} = -k \frac{\alpha}{k} = -\alpha. \quad (16.21)$$

Уравнение (16.21) — это линейное однородное дифференциальное уравнение. Его решением относительно $\Pi(t)$ является

$$\Pi(t) = c_1 - \alpha t, \quad (16.22)$$

где c_1 — постоянная величина, имеющая размерность $\Pi(t)$.

Значение постоянной c_1 найдем с учетом условия (16.20). Для этого, подставив в (16.22) вместо $\Pi(t)$ и t $\Pi(T_{\text{пр}})$ и $T_{\text{пр}}$ соответственно, получим

$$c_1 = \Pi_{\text{пр}} + \alpha_1 T_{\text{пр}}.$$

В результате выражение для уравнения отказа

$$\Pi(t) = \Pi_{\text{пр}} + \alpha_1 T_{\text{пр}} - \alpha_1 t = \Pi_{\text{пр}} + \alpha_1 (T_{\text{пр}} - t). \quad (16.23)$$

Полученное уравнение, характеризующие достижение параметром предельного состояния, можно рассматривать в качестве базового для решения задачи по определению вероятностных характеристик распре-

деления времени до выхода исследуемого параметра за заданные предельные значения.

В зависимости от характера значений, которые принимают параметры уравнения (16.23) (детерминированные или случайные), выделим и рассмотрим три частных случая модели.

16.3.1. Линейно-веерная модель

В этой модели предполагается, что скорость изменения исследуемого параметра α является случайной величиной с известной плотностью распределения $w(\alpha)$. Моменту достижения параметром предельного значения $T_{\text{пр}}$ соответствует значение $\Pi_{\text{пр}}$. Задача состоит в определении закона распределения времени достижения параметром предельного значения.

Исходя из условия задачи, уравнение (16.23) запишем в следующем виде:

$$\Pi(t) - \Pi_{\text{пр}} = -\alpha(t - T_{\text{пр}}), \quad (16.24)$$

или

$$\Pi(t) - \Pi_{\text{пр}} = \alpha\tau, \quad (16.25)$$

где $\tau = T_{\text{пр}} - t$ — время до достижения параметром предельного значения.

Из (16.25) следует, что τ пропорционально разности между текущим значением параметра и его предельным значением и обратно пропорционально скорости дрейфа параметра:

$$\tau = \frac{\Pi(t) - \Pi_{\text{пр}}}{\alpha} = \frac{\Delta\Pi}{\alpha}, \quad (16.26)$$

где α — случайная величина.

Таким образом, случайные величины τ и α имеют однозначную зависимость

$$\tau = \varphi(\alpha).$$

Поскольку распределение $w(\alpha)$ известно, решение задачи сводится к определению закона распределения функции случайного аргумента. При условии, что $w(\alpha)$ дифференцируема, имеем

$$w(\tau) = w(\alpha) |d\alpha/d\tau|, \quad (16.27)$$

т.е. искомое распределение случайной величины τ выражается через распределения случайной величины α и производную от функции обратной функции.

Используя (16.26), получаем

$$d\alpha/d\tau = -\Delta\Pi/\tau^2. \quad (16.28)$$

Подставив (16.28) в (16.27), имеем

$$w(\tau) = w(\alpha) \Delta\Pi/\tau^2. \quad (16.29)$$

Равенство (16.29) позволяет определить плотность распределения времени до достижения параметром предельного значения при произвольном распределении его скорости дрейфа. Вероятность невыхода параметра за пределы рабочей области за заданное время $T_{\text{пр}}$:

$$P(T_{\text{пр}}) = P(\tau < T_{\text{пр}}) = \int_{T_{\text{пр}}}^{\infty} w(\tau) d\tau. \quad (16.30)$$

Для частного случая, когда параметр α изменяется по нормальному закону, имеем

$$\begin{aligned} w(\tau) &= \frac{\Delta\Pi}{\tau^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\alpha}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{\alpha}^2} \left(\frac{\Delta\Pi}{\tau} - m_{\alpha} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{\Delta\Pi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\alpha}\tau^2} \exp \left[-\frac{(\Delta\Pi - m_{\alpha}\tau)^2}{2\sigma_{\alpha}^2\tau^2} \right]. \end{aligned} \quad (16.31)$$

16.3.2. Линейно-равномерная модель

В этой модели скорость изменения параметра α является величиной постоянной, а значение параметра Π является случайной величиной, распределенной по произвольному закону. Предельно допустимое значение параметра $\Pi_{\text{пр}}$ задано. Проводя рассуждения, аналогичные приведенным при анализе линейно-веерной модели, получаем равенство аналогичное (16.26):

$$\tau = \frac{\Delta\Pi}{\alpha}, \quad (16.32)$$

где $\Delta\Pi$ — случайная величина. В рассматриваемом случае взаимнооднозначной зависимостью связаны случайные величины τ и $\Delta\Pi$:

$$\tau = \varphi(\Delta\Pi).$$

Так как плотность распределения $\Delta\Pi$ известна, тогда

$$w(\tau) = w(\Delta\Pi) |d(\Delta\Pi)/d\tau|.$$

Из равенства (16.32) следует, что

$$d(\Delta\Pi)/d\tau = \alpha,$$

тогда

$$w(\tau) = w(\Delta\Pi)\alpha.$$

Для случая, когда случайная величина $\Delta\Pi$ распределена по нормальному закону,

$$w(\tau) = \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\Pi}} \exp \left[-\frac{(\Delta\Pi - m_{\Delta\Pi})^2}{2\sigma_{\Delta\Pi}^2} \right]. \quad (16.33)$$

16.3.3. Линейная модель с двумя случайными коэффициентами

Здесь рассматривается случай, когда оба коэффициента Π и α модели дрейфа параметра являются случайными величинами с произвольными законами распределения. Из условия задачи следует, что

$$\tau = \varphi(\Delta\Pi, \alpha).$$

Определим обратную функцию

$$\Delta\Pi = \psi_{\Delta\Pi}(\tau, \alpha) = \tau\alpha.$$

В соответствии с правилами нахождения функции от нескольких случайных величин

$$w(\tau) = \int_0^\infty w_{\Delta\Pi}[\psi_{\Delta\Pi}(\tau, \alpha)]w(\alpha)|J|d\alpha,$$

где $J = d\psi_{\Delta\Pi}(\tau, \alpha)/d\tau$ — якобиан обратного преобразования, или

$$w(\tau) = \int_0^\infty w(\alpha\tau)w(\alpha)Jd\alpha. \quad (16.34)$$

Если в качестве обратной величины взять α , то

$$w(\tau) = \int_0^\infty w(\Delta\Pi)w(\Delta\Pi/\tau)Jd\alpha.$$

Для частного случая, когда $\Delta\Pi$ и α распределены по нормальному закону с параметрами $m_{\Delta\Pi}$, m_α , $\sigma_{\Delta\Pi}$, σ_α , можно записать

$$w(\tau) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Delta\Pi}\sigma_\alpha} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\Delta\Pi - m_{\Delta\Pi})^2}{2(\sigma_{\Delta\Pi})^2}\right] \exp\left[-\frac{(\alpha - m_\alpha)^2}{2\sigma_\alpha^2}\right] \alpha d\alpha. \quad (16.35)$$

Таким образом, полученные аналитические выражения позволяют определить распределение времени до достижения параметром РЭИ предельного значения при линейном дрейфе определяющего параметра и произвольном распределении параметров линейной модели. Вероятность достижения параметром предельного значения определяется в этом случае формулой (16.30).

Применительно к средствам измерений полученные аналитические зависимости позволяют определить плотность распределения времени наступления метрологического отказа, т.е. отказа, вызванного выходом метрологической характеристики за установленные допуски. Если в качестве метрологической характеристики взять погрешность средства измерений, то дрейф необходимо рассматривать относительно верхнего допуска и в правой части формулы (16.22) знак изменить на противоположный.

Таким образом, рассмотренный вероятностный подход можно использовать в качестве одного из возможных методов определения про-

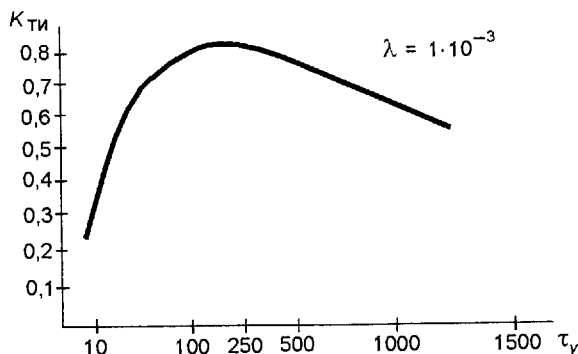


Рис. 16.7. Вариант графического решения зависимости (16.38)

должительности межповерочного интервала средств измерений.

В качестве второго примера рассмотрим аналитическую модель управления техническим состоянием РЭИ в процессе эксплуатации.

Техническое состояние (качество) РЭИ, находящегося в режиме непрерывной эксплуатации, будем оценивать комплексным показателем надежности изделия — коэффициентом технического использования

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{бп}}}{T_{\text{то}} + T_{\text{в}} + \tau_y}, \quad (16.36)$$

где $T_{\text{бп}}$ — среднее время безотказной работы изделия; $T_{\text{то}}$, $T_{\text{в}}$ — среднее время, затрачиваемое на техническое обслуживание и восстановление изделия при отказе соответственно; τ_y — интервал времени между двумя последовательными управляющими воздействиями.

Задача управления заключается в выборе периодичности управляющего воздействия τ_y в виде операции технического обслуживания и ремонта РЭИ, обеспечивающего максимальное пребывание РЭИ в исправном (работоспособном) состоянии, т.е. максимальное значение $K_{\text{ти}}$.

Будем считать, что контроль технического состояния РЭИ проводится только в процессе его технического обслуживания и ремонта и интенсивность отказов во время эксплуатации не меняется ($\lambda = \text{const}$).

Для данного случая

$$T_{\text{бп}} = \int_0^{\tau_y} P(t) dt = \int_0^{\tau_y} e^{-\lambda t} dt, \quad (16.37)$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы изделия. Интегрируя (16.37) и подставляя в (16.36), получаем

$$K_{\text{ти}} = \frac{1}{\tau_y + T_{\text{то}} + T_{\text{в}}} \frac{1 - e^{-\lambda \tau_y}}{\lambda}. \quad (16.38)$$

Графическая зависимость $K_{\text{ти}} = \varphi(\tau_y)$ представлена на рис. 16.7 при $\lambda = 1 \cdot 10^{-2}$ час, $T_{\text{то}} = 24$ часа, $T_{\text{в}} = 1$ час. Из графика видно,

что при заданных условиях оптимальная периодичность управляющего воздействия, обеспечивающая максимальное значение качества РЭИ по комплексному показателю надежности, равна $\tau_y = 250$ часов.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные показатели качества изделий. Дайте их характеристику.
2. Поясните субъективный способ задания комплексного показателя качества по принципу среднего взвешенного.
3. Запишите формулу расчета комплексного показателя качества на основе среднего взвешенного геометрического.
4. Назовите критерии оценивания качества.
5. Дайте классификацию методов оценивания качества.
6. Поясните порядок нахождения оценок единичных показателей качества.
7. С какой целью рассчитывается коэффициент конкордации.
8. Поясните порядок получения количественных значений весовых коэффициентов на основе результатов экспертного ранжирования.
9. Как проводится непосредственный расчет количественных значений весовых коэффициентов?
10. Назовите основные стадии жизненного цикла продукции.
11. Можно ли управлять качеством продукции при ее использовании по назначению?

Техническое регулирование, стандартизация и сертификация

Принципиальные изменения в процесс технического регулирования, т.е. в порядок разработки и установления обязательных к исполнению требований для продукции и связанных с ее обращением процессов внес Федеральный закон «О техническом регулировании», вступивший в силу 1 июля 2003 года.

Появление этого Закона в определенной мере связано с интеграцией России в мировое экономическое сообщество и возникающими при этом некоторыми техническими и экономическими барьерами.

Основная цель Закона — создание двухуровневой системы нормативных документов, включающей в себя технические регламенты, содержащие обязательные требования, и добровольные стандарты.

17.1. Общие положения, принципы технического регулирования и технические регламенты

Техническое регулирование — это правовое регулирование отношений в трех областях:

- в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации;
- в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг;
- в области оценивания соответствия.

Понятие «техническое регулирование» определяет принципиально новый подход ко всему процессу регулирования отношений при установлении, применении и исполнении обязательных и добровольных требований к объектам регулирования.

Объектами регулирования являются продукция; процессы производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации; работы; услуги. При этом следует подчеркнуть, что на продукцию и связанные с ней процессы разрабатываются и применяются как обязатель-

ные, так и добровольно исполняемые требования, а на выполнение работ и оказание услуг — только добровольные требования.

Техническое регулирование осуществляется в соответствии со следующими основными принципами:

1. Единства правил установления требований к объектам технического регулирования. Данный принцип позволяет исключить ситуацию, когда требования к продукции разрабатываются в различных ведомствах, и при этом оказываются дублирующими или взаимоисключающими.

2. Соответствия технического регулирования уровню развития национальной экономики, развитию материально-технической базы, а также уровню научно-технического развития.

3. Независимости органов по аккредитации, органов по сертификации от изготовителей, продавцов, исполнителей и приобретателей.

4. Единой системы и правил аккредитации.

5. Единства правил и методов исследований (испытаний) и измерений при проведении процедур обязательной оценки соответствия.

6. Единства применения требований технических регламентов независимо от видов или особенностей сделок.

7. Недопустимости ограничения конкуренции при осуществлении аккредитации и сертификации.

8. Недопустимости совмещения полномочий органа государственного контроля (надзора) и органа по сертификации.

9. Недопустимости совмещения одним органом полномочий на аккредитацию и сертификацию.

10. Недопустимости внебюджетного финансирования государственного контроля (надзора) за соблюдением требований технических регламентов.

Преследуя цель сближения национальной системы технического регулирования с системами технического регулирования стран общего рынка и ВТО Закон «О техническом регулировании» вводит принципиально новое понятие — «технический регламент», определяя его как документ, который устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции, в том числе зданиям, строениям и сооружениям, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации).

Технические регламенты как инструменты технического регулирования принимаются для достижения следующих трех целей:

- защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;
- охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;
- предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Технические регламенты устанавливают минимально необходимые требования, которые обеспечивают: безопасность излучений, биологическую безопасность, взрывобезопасность, механическую безопасность, пожарную безопасность, промышленную безопасность, термическую безопасность, химическую безопасность, электрическую безопасность, ядерную и радиационную безопасность, электромагнитную совместимость в части обеспечения безопасности работ приборов и оборудования, единство измерений.

В России применяются общие технические регламенты и специальные технические регламенты.

Общие технические регламенты применимы для любых видов продукции и процессов. Вместе с тем они должны обязательно приниматься по следующим вопросам: безопасной эксплуатации и утилизации машин и оборудования; безопасной эксплуатации зданий, строений, сооружений и безопасного использования прилегающих к ним территорий; пожарной безопасности; биологической безопасности; электромагнитной совместимости; экологической безопасности; ядерной и радиационной безопасности.

Специальные технические регламенты устанавливают требования только к тем отдельным видам продукции и процессам, в отношении которых общие технические регламенты не обеспечивают достижения трех указанных выше целей.

Технические регламенты могут быть приняты следующими правовыми актами: международным договором России; Федеральным законом; указом Президента РФ; постановлением Правительства РФ.

Порядок разработки и принятия технического регламента определены Законом «О техническом регулировании», где выделены следующие основные положения:

- разработчиком проекта технического регламента может быть любое лицо, то есть разработка требований не является монополией государства.
- о разработке проекта технического регламента должно быть опубликовано уведомление.
- после опубликования уведомления проект технического регламента должен быть доступен заинтересованным лицам для ознакомления.
- проект технического регламента дорабатывается с учетом полученных в письменной форме замечаний и публично обсуждается.
- о завершении публичного обсуждения проекта технического регламента должно быть опубликовано уведомление.
- проект Федерального закона о техническом регламенте, внесенный в Государственную Думу, направляется в Правительство РФ, где готовится отзыв с учетом заключения экспертной комиссии по техническому регулированию.
- дальнейшая процедура принятия Федерального закона, содержащего технический регламент, проходит в соответствии с установленной процедурой принятия законов Государственной Думой.

Издание технического регламента указом Президента РФ или постановлением Правительства РФ допускается в исключительных случаях при возникновении обстоятельств, приводящих к непосредственной угрозе жизни или здоровью граждан или в других неотлагательных случаях оговоренных в Законе «О техническом регулировании».

17.2. Основы стандартизации

В России, как и в других развитых странах мира, стандартизация охватывает различные сферы человеческой деятельности. Она основывается на достижениях науки, техники, передового опыта и неразрывно связана с техническим прогрессом.

С целью установления единых организационных, методических и практических подходов к проведению работ по стандартизации, в России была разработана и в 1970-х годах внедрена Государственная система стандартизации (ГСС). Она представляет собой комплекс правил и положений, которые определяют: основные понятия, цели и задачи стандартизации; структуру органов и служб стандартизации; правила и методику проведения работ по стандартизации; порядок разработки, оформления, издания и внедрения нормативных документов по стандартизации; порядок внесения изменений в нормативные документы; контроль за внедрением и соблюдением стандартов и других нормативных документов и пр.

ГСС непрерывно совершенствовалась и дополнялась. В 1993 году она претерпела определенные преобразования в связи с принятием Закона РФ «О стандартизации». Закон определил общие требования к содержанию стандартов. Была принята новая редакция основных стандартов, объединяющих и упорядочивающих действия по стандартизации. В этом Законе была сделана первая попытка разделить требования стандартов на обязательные и добровольные.

Принципиально новые положения в систему стандартизации внес Закон «О техническом регулировании». В соответствии с указанным Законом стандартизация — это деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение конкурентоспособности продукции, работ и услуг.

Цели, принципы и методы стандартизации. Основные цели стандартизации в настоящее время:

- повышение уровня безопасности жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества, экологической безопасности, безопасности жизни или здоровья животных и растений;
- содействие соблюдению требований технических регламентов;
- повышение уровня безопасности объекта с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и технического характера;

- обеспечение научно-технического прогресса;
- повышение конкурентоспособности продукции, работ, услуг;
- рациональное использование ресурсов;
- техническая и информационная совместимость;
- сопоставимость результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных;
- взаимозаменяемость продукции.

Под безопасностью при формулировании целей понимается состояние, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений.

Следует отметить, что если по Закону РФ «О стандартизации» обеспечение единства измерений являлось целью стандартизации, то в соответствии с Законом «О техническом регулировании» единство измерений стало сферой технического регулирования. Целями стандартизации стало *повышение* уровня безопасности продукции, работ и услуг, а не *обеспечение* безопасности, как это было ранее.

Деятельность в области стандартизации основывается на использовании определенных принципов и методов, являющихся ее теоретической основой.

Современная стандартизация осуществляется в соответствии со следующими принципами, определенными в Законе «О техническом регулировании»:

- добровольного применения стандартов;
- максимального учета при разработке стандартов законных интересов заинтересованных лиц;
- применения международного стандарта как основы разработки национального стандарта;
- недопустимости создания препятствий производству и обращению продукции, выполнению работ и оказанию услуг в большей степени, чем это минимально необходимо для выполнения целей стандартизации;
- недопустимости установления таких стандартов, которые противоречат техническим регламентам;
- обеспечения условий для единообразного применения стандартов.

Метод стандартизации — это прием или совокупность приемов, с помощью которых достигаются цели стандартизации.

В настоящее время находят применение различные методы стандартизации. Наиболее широко используемыми методами стандартизации являются унификация, агрегатирование, ограничение, типизация.

Метод унификации состоит в рациональном сокращении видов, типов и размеров объектов одинакового функционального назначения. Объектами унификации наиболее часто являются отдельные изделия, их составные части, детали, марки материалов и т.п. Цель унификации —

установление минимально необходимого для практики числа типов, видов и типоразмеров изделий, обладающих высокими показателями качества и полной взаимозаменяемостью.

Метод агрегатирования заключается в создании новых объектов из ограниченного набора отдельных стандартных, унифицированных узлов, обладающих геометрической и функциональной взаимозаменяемостью и многократно используемых при создании различных изделий. Метод агрегатирования обеспечивает конструктивную преемственность при модернизации и создании новых изделий, а также позволяет сократить трудоемкость при их проектировании, изготовлении и ремонте. Агрегатирование широко распространено в радиоэлектронике и приборостроении при проектировании радиоэлектронной аппаратуры и измерительных приборов на основе прогрессивного функционально-узлового метода.

Метод ограничения (симплификации) состоит в отборе из существующей совокупности объектов целесообразного их минимума. Он позволяет упростить производство, снабжение, складирование. Симплификацию рассматривают в ряде случаев как простейшую форму унификации.

Метод типизации заключается в установлении типовых (образцовых) объектов для данной совокупности, принимаемых за основу (образец) при создании других объектов, близких по функциональному назначению, например типовые корпуса для различных средств измерений.

Нормативные документы по стандартизации. Непосредственным результатом стандартизации является нормативный документ (НД). Он устанавливает правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или результатов. Основным нормативным документом является стандарт. Стандарт — это документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг.

Кроме того, стандарт может содержать требования к терминологии, символике, упаковке, маркировке или этикеткам и правилам их нанесения.

Стандарты, как следует из приведенного выше определения, перестали быть обязательными, они отнесены к разряду документов, принимаемых добровольно. Вместе с тем национальные стандарты и общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации представляют собой основу современной национальной системы стандартизации.

Создание системы нормативных документов является одной из основных задач стандартизации. Принято различать международные стандарты, региональные стандарты, межгосударственные стандарты (ГОСТ). Международные стандарты используются в странах входящих в Международную организацию по стандартизации (ИСО). Примером региональных стандартов могут быть Европейские стандарты. В странах, заклю-

чивших между собой соответствующее соглашение, могут использоваться межгосударственные стандарты, например, стандарты стран СНГ.

На территории России применяют следующие основные документы по стандартизации: национальные стандарты (ГОСТ Р); правила стандартизации, нормы и рекомендации в области стандартизации; общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации; стандарты организаций.

Порядок разработки национальных стандартов определяет Закон РФ «О техническом регулировании», а утверждает стандарты национальный орган по стандартизации. Национальный орган по стандартизации разрабатывает и утверждает программу разработки национальных стандартов и обеспечивает доступность программы разработки заинтересованным лицам для ознакомления.

Процедура разработки и утверждения национальных стандартов содержит следующие основные позиции:

- разработчиком национального стандарта может быть любое лицо;
- уведомление о разработке национального стандарта публикуют, оно должно содержать сведения об отличиях разрабатываемого стандарта от соответствующих международных стандартов;
- разработчик национального стандарта должен обеспечить доступность проекта стандарта заинтересованным лицам для ознакомления;
- разработчик дорабатывает проект национального стандарта с учетом полученных в письменной форме замечаний заинтересованных лиц;
- проект разработанного национального стандарта одновременно с перечнем полученных в письменной форме замечаний заинтересованных лиц представляется в технический комитет по стандартизации, который организует проведение экспертизы данного проекта;
- национальный орган по стандартизации принимает решение об утверждении или отклонении национального стандарта.

Общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации — это нормативные документы, распределяющие технико-экономическую и социальную информацию в соответствии с ее классификацией. Они являются обязательными для применения при создании государственных информационных систем и информационных ресурсов. Порядок разработки, принятия, введения в действие и применения общероссийских классификаторов устанавливает Правительство РФ.

Стандарты организаций, в отличие от национальных стандартов, дополнительно имеют свои специфические цели: для совершенствования производства и обеспечения качества продукции, выполнения работ, оказания услуг; для распространения и использования полученных в различных областях знаний результатов исследований, измерений и разработок.

Порядок разработки, утверждения, учета, изменения и отмены стандартов организаций устанавливаются этими организациями (в том числе коммерческими, общественными, научными организациями, объединениями юридических лиц) самостоятельно.

Проект стандарта организации может представляться разработчиком в технический комитет по стандартизации, который организует проведение экспертизы данного проекта, однако проведение экспертизы не является обязательной.

Международные и национальные организации по стандартизации. На международном уровне вопросами стандартизации занимаются несколько организаций.

Наиболее представительной является международная организация по стандартизации (ИСО). ИСО функционирует с 1947 года и включает в свой состав более 140 государств. Органами ИСО являются Генеральная ассамблея, Совет, комитеты Совета, технические комитеты, Центральный секретариат. Высшим органом ИСО является Генеральная ассамблея, а в период между ее сессиями работой организации руководит Совет.

Проекты международных стандартов разрабатываются рабочими группами технических комитетов. Статус участия в работе технических комитетов каждый член ИСО определяет самостоятельно в зависимости от степени заинтересованности. Разработанные и одобренные большинством активных членов организации стандарты и рекомендации формально не являются обязательными нормативными документами, однако фактически соблюдаются и используются на практике по мере возникающих потребностей.

Среди других международных организаций, занимающихся разработкой международных стандартов, наиболее представительными являются Международная электротехническая комиссия (МЭК), Международный союз электросвязи (МСЭ), Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), Европейская организация по контролю качества (ЕОКК) и др.

В России орган, уполномоченный на исполнение функций национального органа по стандартизации, определяет Правительство РФ. Таким органом является Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, подведомственное Министерству промышленности и энергетики России.

Основные функции национального органа России по стандартизации:

- утверждение национальных стандартов;
- принятие программы разработки национальных стандартов;
- организация экспертиз проектов национальных стандартов;
- обеспечение соответствия национальной системы стандартизации интересам национальной экономики, состоянию материально-технической базы и научно-техническому прогрессу;

- осуществление учета национальных стандартов, правил стандартизации, норм и рекомендаций в этой области и обеспечения их доступности заинтересованным лицам;
- создание технических комитетов по стандартизации и координация их деятельности;
- организация опубликования национальных стандартов и их распространение;
- участие в соответствии с уставами международных организаций в разработке международных стандартов и обеспечение интересов России при их принятии;
- утверждение изображения знака соответствия национальным стандартам;
- представление России в международных организациях, осуществляющих деятельность в области стандартизации.

Для проведения работ по стандартизации на национальном и отраслевом уровнях, а также на предприятиях создают специальные организации и подразделения (службы стандартизации).

Порядок создания и деятельности технических комитетов по стандартизации утверждается национальным органом по стандартизации. В состав технических комитетов по стандартизации на паритетной и добровольной основе могут включаться представители федеральных органов исполнительной власти, научных организаций, саморегулируемых организаций, общественных объединений предпринимателей и потребителей. Заседания технических комитетов по стандартизации являются открытыми.

Координация работ по стандартизации в отраслях народного хозяйства в необходимых случаях осуществляется через подразделения (службы) стандартизации министерств и других органов государственного управления, а также через головные организации по стандартизации, имеющие высокий научно-технический потенциал в соответствующих областях науки и техники.

На предприятиях при необходимости создают службы стандартизации (отделы, бюро, лаборатории), которые выполняют необходимые работы по стандартизации.

17.3. Основы сертификации

Слово «сертификат» в переводе с латинского означает «сделано верно». В Законе «О техническом регулировании» дается следующее определение сертификации.

Сертификация — это форма осуществления органом по сертификации подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Подтверждение соответствия — это документальное удостоверение соответствия продукции или иных объектов, процессов производства,

эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Основные цели подтверждения соответствия:

- удостоверение соответствия продукции, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, работ, услуг или иных объектов техническим регламентам, стандартам, условиям договоров;
- содействие приобретателям в компетентном выборе продукции, работ, услуг;
- повышение конкурентоспособности продукции, работ, услуг на российском и международном рынках;
- создание условий для обеспечения свободного перемещения товаров по территории России, а также для осуществления международного экономического, научно-технического сотрудничества и международной торговли.

Подтверждение соответствия осуществляется на основе следующих принципов:

- доступности информации о порядке осуществления подтверждения соответствия заинтересованным лицам;
- недопустимости применения обязательного подтверждения соответствия к объектам, в отношении которых не установлены требования технических регламентов;
- установления перечня форм и схем обязательного подтверждения соответствия в отношении определенных видов продукции в соответствующем техническом регламенте;
- уменьшения сроков осуществления обязательного подтверждения соответствия и затрат заявителя;
- недопустимости принуждения к осуществлению добровольного подтверждения соответствия, в том числе в определенной системе добровольной сертификации;
- защиты имущественных интересов заявителей, соблюдения коммерческой тайны в отношении сведений, полученных при осуществлении подтверждения соответствия;
- недопустимости подмены обязательного подтверждения соответствия добровольной сертификацией.

Закон РФ «О техническом регулировании» устанавливает, что подтверждение соответствия разрабатывается и применяется равным образом и в равной мере независимо от страны и места происхождения продукции, то есть всем отечественным изготовителям и импортерам гарантируются равные условия и ко всем предъявляются равные требования.

Подтверждение соответствия на территории России может носить добровольный или обязательный характер (рис. 17.1).

Добровольное подтверждение соответствия осуществляется в форме добровольной сертификации. Под сертификацией здесь понимается

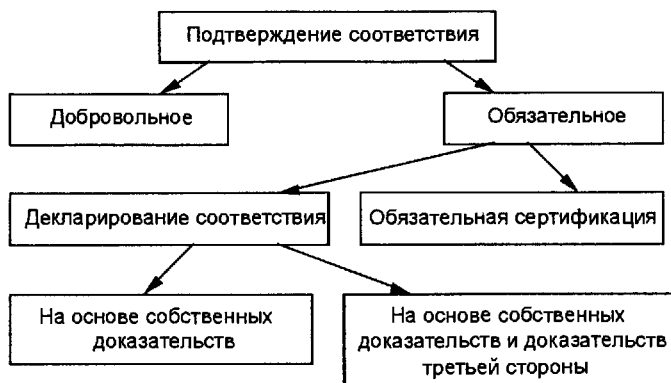


Рис. 17.1. Формы и схемы подтверждения соответствия

форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Объектом добровольного подтверждения соответствия являются объекты, в отношении которых стандартами, системами добровольной сертификации и договорами устанавливаются требования.

Добровольная сертификация осуществляется органом по сертификации в рамках системы сертификации.

Система сертификации — это совокупность правил выполнения работ по сертификации ее участников.

Система добровольной сертификации может быть создана юридическим лицом и (или) индивидуальным предпринимателем. Она может быть зарегистрирована федеральным органом исполнительной власти по техническому регулированию после представления в орган исполнительной власти документов, предусмотренных Законом «О техническом регулировании».

Орган по сертификации — это юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, аккредитованные в установленном порядке для выполнения работ по сертификации. На орган по сертификации возложены следующие функции:

- осуществлять подтверждение соответствия объектов добровольного подтверждения соответствия;
- выдавать сертификаты соответствия на объекты, прошедшие добровольную сертификацию;
- представлять заявителям право на применение знака соответствия, если применение знака соответствия предусмотрено соответствующей системой добровольной сертификации;
- приостанавливать или прекращать действие выданных им сертификатов соответствия.

Федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию ведет единый реестр зарегистрированных систем доброволь-

ной сертификации. Сведения, содержащиеся в реестре, должны быть доступны всем заинтересованным лицам.

Обязательное подтверждение соответствия проводится только в случаях, установленных соответствующим техническим регламентом, и только на соответствие требованиям технического регламента. Объектом обязательного подтверждения соответствия может быть только продукция, выпускаемая в обращение на территории России.

Обязательное подтверждение соответствия осуществляется в двух формах: в форме принятия декларации о соответствии; в форме обязательной сертификации. Декларация соответствия и сертификат соответствия имеют равную юридическую силу.

Декларирование соответствия возможно по одной из следующих двух схем: 1) принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств; 2) принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств и доказательств, полученных с участием третьей стороны. Третьей стороной могут быть орган по сертификации или аккредитованная испытательная лаборатория. Декларирование соответствия с участием третьей стороны устанавливается в техническом регламенте в случае, если отсутствие третьей стороны не приводит к достижению целей соответствия.

При использовании первой схемы декларирования соответствия заявитель формирует доказательные материалы самостоятельно. Состав доказательных материалов определяется соответствующим техническим регламентом. Такими материалами могут быть техническая документация, результаты собственных исследований и измерений и другие документы.

При использовании второй схемы декларирования соответствия заявитель по своему усмотрению в дополнение к собственным доказательствам добавляет результаты исследований, проведенных в испытательной лаборатории, или сертификат соответствия качества при условии, что заявителем проведена такая сертификация.

Для регистрации декларации о соответствии заявитель представляет в орган исполнительной власти по техническому регулированию оформленную в соответствии с установленными требованиями декларацию соответствия, которая им регистрируется в реестре деклараций о соответствии.

Обязательная сертификация осуществляется органом по сертификации на основании договора с заявителем по схемам предусмотренным техническими регламентами.

Сведения, отражаемые в сертификате соответствия, права и обязанности органа по сертификации определены в Законе «О техническом регулировании».

Орган по сертификации имеет право привлекать к проведению исследований аккредитованные испытательные лаборатории, проводить инспекционный контроль, приостанавливать или прекращать действие

выданного сертификата соответствия, устанавливать стоимость работ по сертификации.

Основные обязанности органа по сертификации: вести реестр выданных им сертификатов соответствия; представлять данные о выданных сертификатах в федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию для составления единого реестра; информировать соответствующие органы государственного контроля (надзора) за соблюдением требований технических регламентов о продукции, поступившей на сертификацию, но не прошедшей ее; представлять заявителям информацию о порядке проведения обязательной сертификации.

Контрольные вопросы и задания

1. Что включает в себя понятие «техническое регулирование»?
2. Назовите принципы технического регулирования.
3. Что включает в себя понятие «технический регламент»?
4. Каково целевое назначение технических регламентов?
5. В чем отличие специальных технических регламентов от общих технических регламентов?
6. Каков порядок принятия технических регламентов?
7. Что такое стандартизация?
8. Назовите основные цели и принципы стандартизации.
9. Какие методы стандартизации Вы знаете?
10. Какие международные организации в области стандартизации Вам известны?
11. Назовите национальный орган России по стандартизации.
12. Каковы основные функции национального органа России по стандартизации?
13. Назовите основные документы в области стандартизации.
14. Назовите основные цели и принципы подтверждения соответствия.
15. Какие формы и схемы подтверждения соответствия Вам известны?

Литература

1. **Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В.** Вычислительные методы для инженеров: Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1994. — 554 с.
2. **Аристов О.В. Белоусов Ю.Н., Макаров Э.Ф.** Измерители параметров цепей с сосредоточенными постоянными и их поверка. — М.: ВИСМ, 1985. — 86 с.
3. **Артемьев Б.Г., Голубов С.М.** Справочное пособие для работников метрологических служб. — М.: Изд-во стандартов, 1990.
4. **Барченков А.И., Петров В.А.** Основы метрологического обеспечения связи и автоматизированных систем управления. Часть I. — СПб.: СПВВИУС, 1992. — 284 с.
5. **Бакланов И.Г.** Технология измерений в современных телекоммуникациях. — М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1997.
6. **Богомолов Ю.А. Медовикова Н.Я.** Государственный метрологический надзор. — М.: АСМС, 1996. — 30 с.
7. **Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н.** Метрология. Шкалы, эталоны, практика. — М.: ВНИИФТРИ, 2004. — 222 с.
8. **Буравлев А.И.** и др. Управление техническим состоянием динамических систем. — М.: Машиностроение, 1995. — 240 с.
9. **Будник В.С., Коморников П.М.** Основы метрологии и измерений в технике связи. — Л.: ВАС, 1991. — 113 с.
10. **Бутырин П.А., Васьковская Т.А.** Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7. — М.: ДНК Пресс, 2005. — 264 с.
11. **Глудкин О.П., Гуров А.И., Коробов А.И.** и др. Управление качеством электронных средств. — М.: Высш. шк., 1994.
12. **Глудкин О.П., Горбунов Н.М., Гуров А.И., Зорин Ю.В.** Всеобщее управление качеством. — М.: Радио и связь, 1999. — 600 с.
13. **Грудинин А.Е.** и др. Основы метрологического обеспечения вооружения и военной техники. — М.: МО РФ, 1995.
14. **Грудинин А.Е.** и др. Войсковые средства радиотехнических измерений. — СПб.: ВИКА, 1996. — 155 с.
15. **Гутников В.С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах. — Л.: Энергия, 1980. — 280 с.
16. **Гусева Т.А., Чапкевич Л.Е.** О техническом регулировании: постатейный комментарий к Федеральному закону. — М.: ЗАО Юстицинформ, 2005. — 144 с.
17. **Душин Е.М.** и др. Основы метрологии и электрические измерения. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.

18. **Дубовой Н.Д., Осокин В.И., Поротов В.Н., Толчинский А.Д.** Автоматизация измерений и контроля электрических и неэлектрических величин. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 328 с.
19. **Евстропов Н.А.** Оценка технического уровня и качества промышленной продукции. — М.: АСМС, 2004.
20. **Евтихеев Н.Н.** и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
21. **Земельман М.А.** Метрологические основы технических измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1991.
22. **Иващенко П.А.** Измерения на сверхвысоких частотах. — М.: ВИСМ, 1983. — 114 с.
23. **Иващенко П.А.** Поверка средств измерений шумовых параметров устройств сверхвысоких частот. — М.: ВИСМ, 1991. — 91 с.
24. **Кравцов А.В.** Метрология и электрические измерения. — М.: Колос, 1999. — 216 с.
25. **Кушнир Ф.В.** Электрорадиоизмерения. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.
26. **Кузнецов В.А.** и др. Измерения в электронике: Справочник. — М.: Энергоиздат, 1987. — 512 с.
27. **Кузнецов В.А., Строителев В.Н., Тимофеев Е.Ю.** и др. Приборно-модульные универсальные автоматизированные измерительные системы. — М.: Радио и связь, 1993. — 300 с.
28. **Кузнецов В.А.** и др. Автоматизация контроля и измерений: Учебное пособие. — М.: МИС, 1990. — 51 с.
29. **Кузнецов В.А., Ялунина Г.В.** Общая метрология. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 272 с.
30. **Литвак Б.Г.** Экспертная информация: методы получения и анализа. — М.: Радио и связь, 2000. — 184 с.
31. **Лифиц И.М.** Основы стандартизации, метрологии и управления качеством товаров: Учебник для вузов. — М., 1994. — 168 с.
32. **Макаров Э.Ф., Налетова А.М.** Основы метрологии. — М.: АСМС, 1999. — 86 с.
33. **Макаров Э.Ф., Белоусов Ю.М., Рахимов Г.Г., Федоров В.Р., Фельдман Р.В.** Автоматизированные цифровые средства измерений параметров сигналов. — М.: ВИСМ, 1985. — 96 с.
34. **Макаров Э.Ф.** Измерители спектров сигналов и их поверка. — М.: ВИСМ, 1991. — 86 с.
35. **Макаров Э.Ф., Налетова А.М.** Электронно-счетные частотомеры и их поверка. — М.: АСМС, 2001. — 62 с.
36. **Маслов А.Я., Анисимов Б.П., Каназеев К.Г., Савичев В.А., Сгобаров В.З.** Электрорадиоизмерения и испытания радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. — М.: МО, 1983. — 330 с.
37. **Мейзда Ф.Ф.** Электронные измерительные приборы и методы измерений. — М.: Мир, 1990. — 535 с.

38. **Мирский Г.Я.** Микропроцессоры в измерительных приборах. — М.: Радио и связь, 1984. — 160 с.
39. **Микаелян С.С., Евангулова А.А.** Применение вычислительной техники в радиотехнических средствах измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 48 с.
40. **Михайлов Ю.Б.** Математические основы повышения точности прогнозирования количественных характеристик процессов. — М.: Научтехлитиздат, 2000. — 205 с.
41. **Назаров Н.Г.** Метрология. Основные понятия и математические модели. — М.: Высшая школа, 2002.
42. **Нефедов В.И., Хахин В.И., Битюков В.К., Федорова Е.В., Белянина Е.К.** Метрология и радиоизмерения. — М.: Высш. шк., 2003. — 526 с.
43. **Никифоров А.Д., Бакиев Т.А.** Метрология, стандартизация и сертификация. — М.: Высш. шк., 2003. — 422 с.
44. **Основополагающие** стандарты в области метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
45. **Петухов Г.Б.** Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. — М.: МО, 1989. — 660 с.
46. **Пронин Н.С.** Основы метрологии динамических измерений. — М.: Логос, 2003. — 256 с.
47. **Романова Л.А.** Метрологические основы поверки и калибровки средств электрических измерений. — М.: АСМС, 1999. — 68 с.
48. **Рихтер Т.С.** Цифровые измерения. Методы и схемотехника. — М.: Техносфера, 2004. — 376 с.
49. **РМГ 29-99** (Рекомендации по межгосударственной стандартизации). Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
50. **Сергеев А.Г., Крохин В.В.** Метрология. — М.: Логос, 2000. — 408 с.
51. **Сенявский А.Л.** Автоматизация контроля и измерений: Учебное пособие. — М.: МИС, 1990. — 51 с.
52. **Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С.** Метрология, стандартизация и технические средства измерений. — М.: Высш. шк., 2001. — 205 с.
53. **Тихонов Б.Н.** Основы метрологии и электрорадиотехнические измерения: Учебное пособие. — Орел: ВИПС, 1999. — 490 с.
54. **Тульгин Л.Г.** и др. Оценка качества электроизмерительных приборов. — Л.: Энергия, 1982. — 216 с.
55. **Хромой Б.П.** и др. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи. — М.: Радио и связь, 1986. — 424 с.
56. **Хромой Б.П.** и др. Метрологическое обеспечение систем передачи. — М.: Радио и связь, 1991. — 392 с.

57. **Цветков Э.И.** Алгоритмические основы измерений. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. — 256 с.
58. **Шишкин И.Ф.** Метрология, стандартизация и управление качеством. — М.: Изд-во стандартов, 1990.

Приложения

Приложение 1

Физические величины

Величина		Единица измерения			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Выражение через основные единицы СИ
			международное	русское	
Длина	L	Метр	m	м	
Масса	M	Килограмм	kg	кг	
Время	T	Секунда	s	с	
Сила электрического тока	I	Ампер	A	А	
Термодинамическая температура	Θ	Кельвин	K	К	
Количество вещества	N	Моль	mol	моль	
Сила света	J	Кандела	cd	кд	
Плоский угол		Радян	rad	рад	
Телесный угол		Стерadian	sr	ср	
Частота	T	Герц	Hz	Гц	s^{-1}
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 \cdot M \cdot T^2$	Ватт	W	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Количество электричества (электрический заряд)	TI	Кулон	C	Кл	$s \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2 MT^3 I^{-1}$	Вольт	V	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^2 M^{-1} TI^{-2}$	Фарад	F	Ф	$m^2 kg^{-1} s \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2 MT^3 I^{-2}$	Ом	Ω	Ом	$m^2 kg \cdot s^{-3} A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	Сименс	S	См	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^2 MT^2 I^{-1}$	Вебер	Wb	Вб	$M \cdot kg \cdot s^{-2} A^{-1}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$MT^{-2} I^{-1}$	Тесла	T	Тл	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2 MT^{-2} I^{-2}$	Генри	H	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} A^{-2}$

Приложение 2

Образование десятичных и дольных единиц и их множителей

Приставка				Примеры
Наименование	Обозначение		Множитель	
	международное	русское		
экса	E	Э	10^{18}	эксабеккерель — ЭВк
пета	P	П	10^{15}	петаджоуль — ПДж
терра	T	Т	10^{12}	тервагерц — ТГц
гига	G	Г	10^9	гигаватт — ГВт
мега	M	М	10^6	мегаом — МОм
кило	k	к	10^3	километр — км
гекто	h	г	10^2	гектолитр — гл
дека	da	да	10^1	декалитр — дал
деци	d	д	10^{-1}	дециметр — дм
санти	c	с	10^{-2}	сантиметр — см
милли	m	м	10^{-3}	милливольт — мВ
микро	μ	мк	10^{-6}	микроампер — мкА
нано	n	н	10^{-9}	наносекунда — нс
пико	p	п	10^{-12}	пикофарад — пФ
фемто	f	ф	10^{-15}	фемтокулон — фКл
атто	a	а	10^{-18}	аттограмм — аг

Приложение 3

Предельные значения β для проверки грубой погрешности

Объем выборки n	Предельное значение β при уровне значимости α			
	0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,42	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71
21	2,39	2,48	2,58	2,73
22	2,40	2,50	2,59	2,75
23	2,41	2,52	2,60	2,77
24	2,43	2,56	2,62	2,80

Приложение 4

Таблица интеграла вероятностей $\psi(z)$

z	$\psi(z)$	z	$\psi(z)$	z	$\psi(z)$	z	$\psi(z)$
0,00	0,00000	1,00	0,68269	2,00	0,95450	3,00	0,99730
0,05	0,03988	1,05	0,70628	2,05	0,95964	3,10	0,99806
0,10	0,07966	1,10	0,72867	2,10	0,96427	3,20	0,99863
0,15	0,11924	1,15	0,74986	2,15	0,96844	3,30	0,99903
0,20	0,15852	1,20	0,76986	2,20	0,97219	3,40	0,99933
0,25	0,19741	1,25	0,78870	2,25	0,97555	3,50	0,99953
0,30	0,23582	1,30	0,80640	2,30	0,97855	3,60	0,99968
0,35	0,27366	1,35	0,82298	2,35	0,98123	3,70	0,99978
0,40	0,31084	1,40	0,83849	2,40	0,98360	3,80	0,99986
0,45	0,34729	1,45	0,85294	2,45	0,98571	3,90	0,99990
0,50	0,38292	1,50	0,86635	2,50	0,98758	4,00	0,99994
0,55	0,41768	1,55	0,87886	2,55	0,98922	4,10	0,99996
0,60	0,54149	1,60	0,89040	2,60	0,99069	4,20	0,99997
0,65	0,48431	1,65	0,90106	2,65	0,99195	4,40	0,99999
0,70	0,51607	1,70	0,91087	2,70	0,99307	4,50	0,99999
0,75	0,54675	1,75	0,91988	2,75	0,99404		
0,80	0,57629	1,80	0,92814	2,80	0,99489		
0,85	0,60468	1,85	0,93569	2,85	0,99563		
0,90	0,63188	1,90	0,94257	2,90	0,99627		
0,95	0,65789	1,95	0,94882	2,95	0,99682		

Приложение 5

Коэффициенты Стьюдента

$n - 1$	Доверительная вероятность P_d				
	0,900	0,950	0,980	0,990	0,999
1	6,31	12,7	31,8	63,7	636,6
2	2,92	4,30	6,96	9,92	31,6
3	2,35	3,18	4,45	5,84	12,9
4	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
5	2,02	2,57	3,36	4,03	6,87
6	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
7	1,89	2,36	3,00	3,50	5,41
8	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
9	1,93	2,26	2,82	3,25	4,78
10	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
11	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
12	1,78	2,18	2,68	3,05	4,32
13	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
14	1,76	2,14	2,62	2,98	4,14
15	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
16	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
17	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
18	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
19	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
20	1,72	2,09	2,53	2,85	3,85
21	1,72	2,08	2,52	2,83	3,82
22	1,72	2,07	2,51	2,82	3,79
23	1,71	2,07	2,50	2,81	3,77
24	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75

Окончание приложения 5

n - 1	Доверительная вероятность P_d				
	0,900	0,950	0,980	0,990	0,999
25	1,71	2,06	2,49	2,79	3,73
26	1,71	2,06	2,48	2,78	3,71
27	1,70	2,05	2,47	2,77	3,69
28	1,70	2,05	2,47	2,76	3,67
29	1,70	2,05	2,46	2,76	3,66
30	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
40	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55
50	1,68	2,01	2,40	2,68	3,50
60	1,67	2,00	2,39	2,66	3,46
70	1,67	1,99	2,38	2,65	3,44
80	1,66	1,99	2,37	2,64	3,42
90	1,66	1,99	2,37	2,63	3,40
100	1,66	1,98	2,36	2,63	3,39
200	1,65	1,97	2,35	2,60	3,34
300	1,65	1,97	2,34	2,59	3,32
500	1,65	1,96	2,33	2,59	3,31

Приложение 6

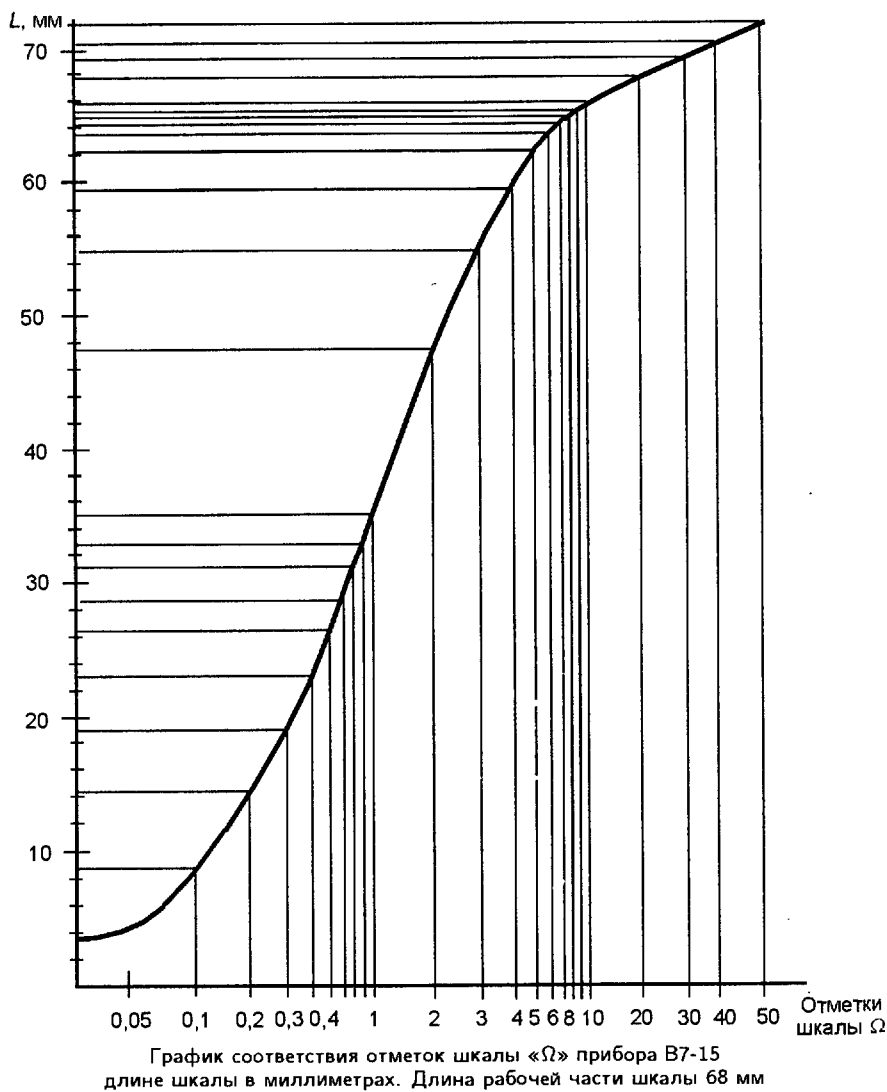
Формулы вычисления погрешностей косвенных измерений [55]

Функция	Погрешность	
	абсолютная	относительная
ax	$\pm a \Delta x$	$\pm \frac{\Delta x}{a}$
$x - y$	$\pm \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$	$\pm \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{x - y}$
$x + y + z$	$\pm \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$	$\pm \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}{x + y + z}$
xy	$\pm \sqrt{x^2(\Delta y)^2 + y^2(\Delta x)^2}$	$\pm \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$
xyz	$\pm [(\Delta x)^2(yz)^2 + (\Delta y)^2(xz)^2 + (\Delta z)^2(xy)^2]^{1/2}$	$\pm \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2}$
x^n	$\pm nx^{n-1} \Delta x$	$\pm n \frac{\Delta x}{x}$
$\sqrt[n]{x}$	$\pm \frac{1}{n} x^{1/(n-1)} \Delta x$	$\pm \frac{1}{n} \frac{\Delta x}{x}$
$\frac{x}{y}$	$\pm \sqrt{\frac{y^2(\Delta x)^2 + x^2(\Delta y)^2}{y^n}}$	$\pm \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$
$\ln \frac{x}{y}$	$\pm \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$	$\pm \frac{1}{\ln x/y} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$
$\sin x$	$\pm \cos x \Delta x$	$\pm \operatorname{ctg} x \Delta x$
$\cos x$	$\pm \sin x \Delta x$	$\pm \operatorname{tg} x \Delta x$
$\operatorname{tg} x$	$\pm \frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\pm \frac{2 \Delta x}{\sin 2x}$

Окончание приложения 6

Функция	Погрешность	
	абсолютная	относительная
$\operatorname{ctg} x$	$\pm \frac{\Delta x}{\sin x}$	$\pm \frac{2\Delta x}{\sin 2x}$
$\operatorname{arctg} x$	$\pm \frac{\Delta x}{1+x^2}$	$\pm \frac{\Delta x}{\operatorname{arctg}(1+x^2)}$

Приложение 7



Оглавление

Предисловие	3
Часть I. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ	
Глава 1. Физические величины, средства и методы их измерения	6
1.1. Физические величины. Единицы величин	6
1.2. Воспроизведение и хранение информации о размерах единиц физических величин	10
1.3. Средства измерений	12
1.4. Виды и методы измерений	14
1.5. Понятия о шкалах	18
Контрольные вопросы и задания	21
Глава 2. Погрешности измерений и средств измерений	23
2.1. Общие сведения	23
2.2. Погрешности измерений	25
2.3. Погрешности и метрологические характеристики средств измерений	32
2.3.1. Характеристики, определяющие результаты измерений	33
2.3.2. Характеристики погрешностей средств измерений	36
2.3.3. Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам	39
2.3.4. Динамические характеристики средств измерений	40
2.3.5. Характеристики взаимодействия средств измерений с объектами или устройствами на их входе и выходе	41
2.3.6. Классы точности средств измерений	42
Контрольные вопросы и задания	47
Глава 3. Обработка результатов измерений	48
3.1. Обнаружение и устранение систематических погрешностей	48
3.2. Устранение грубых погрешностей	51
3.3. Обработка результатов прямых однократных измерений	52
3.3.1. Оценивание погрешностей результатов прямых однократных измерений	53
3.3.2. Особенности определения инструментальной составляющей погрешности измерений по нормируемым метрологическим характеристикам средств измерений	56
3.3.3. Определение инструментальной составляющей погрешности по классу точности средств измерений	58
3.4. Обработка результатов прямых многократных измерений	60

3.5. Определение результата и погрешностей косвенных измерений	66
3.6. Приближенные вычисления при обработке результатов измерений	71
3.6.1. Правила записи и округление приближенных чисел	71
3.6.2. Некоторые математические действия с приближенными числами	73
Контрольные вопросы	75
Глава 4. Организационно-правовые основы обеспечения единства измерений	77
4.1. Законодательство РФ об обеспечении единства измерений ..	77
4.2. Национальная система обеспечения единства измерений ...	80
4.3. Основные виды метрологической деятельности по обеспечению единства измерений	86
Контрольные вопросы и задания	92
 Часть II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	
Глава 5. Основные элементы электрорадиоизмерительных приборов	94
5.1. Масштабные измерительные преобразователи	94
5.2. Электромеханические измерительные механизмы	102
5.3. Преобразователи значений величин	107
5.4. Аналого-цифровые преобразователи	116
5.5. Генераторы электрических сигналов	123
5.6. Микропроцессоры	127
5.7. Коды и системы счисления	129
5.8. Цифровые индикаторы	131
Контрольные вопросы и задания	133
Глава 6. Измерительные генераторы сигналов	134
6.1. Назначение, классификация и основные характеристики измерительных генераторов	134
6.2. Измерительные генераторы сигналов низкой частоты (ГЗ) ..	137
6.3. Измерительные генераторы высокой и сверхвысокой частоты (Г4)	138
6.4. Измерительные генераторы импульсов	142
6.5. Измерительные генераторы шумовых сигналов (Г2)	143
Контрольные вопросы и задания	145
Глава 7. Измерение напряжений и токов	146
7.1. Основные значения измеряемых напряжений и токов	146
7.2. Вычисление различных значений переменного напряжения по показаниям вольтметров	149
7.3. Методы измерения напряжения и тока	152

7.3.1. Метод непосредственной оценки	152
7.3.2. Метод сравнения с мерой	153
7.4. Приборы для измерения напряжения и тока	155
7.4.1. Электромеханические вольтметры и амперметры	155
7.4.2. Аналоговые электронные вольтметры и амперметры	158
7.4.3. Цифровые электронные вольтметры	160
Контрольные вопросы и задания	161
Глава 8. Исследование формы электрических сигналов	162
8.1. Классификация и характеристики электронно-лучевых осциллографов	162
8.2. Электронно-лучевая трубка и принцип действия электронного осциллографа	166
8.3. Структурная схема осциллографа	169
8.3.1. Канал вертикального отклонения	169
8.3.2. Канал горизонтального отклонения	173
8.3.3. Канал управления и модуляции луча по яркости (канал Z) ...	181
8.3.4. Калибраторы уровня и временных интервалов	182
8.4. Цифровые осциллографы	183
8.5. Измерение параметров сигналов с помощью универсального осциллографа	185
8.5.1. Измерение амплитудных параметров сигналов	185
8.5.2. Измерение временных параметров электрорадиотехнических сигналов	187
8.5.3. Измерение частоты сигнала	188
8.5.4. Измерение коэффициента амплитудной модуляции амплитудно-модулированного (АМ) сигнала	189
8.5.5. Измерение девиации частоты частотно-модулированного (ЧМ) сигнала	192
Контрольные вопросы и задания	192
Глава 9. Измерения частоты электрических сигналов	194
9.1. Общие сведения	194
9.2. Метод дискретного счета	195
9.2.1. Цифровой частотомер	195
9.2.2. Цифровой измеритель периода	198
9.2.3. Измерение временных интервалов нониусным методом	201
9.3. Метод сравнения	203
9.4. Резонансный метод	205
9.5. Метод перезаряда конденсатора	209
Контрольные вопросы и задания	210
Глава 10. Измерение параметров элементов электрических цепей с сосредоточенными постоянными	211
10.1. Общие сведения о параметрах элементов радиотехнических устройств	211

10.2. Методы измерения параметров элементов, основанные на измерении токов и напряжений	213
10.2.1. Электромеханический омметр	213
10.2.2. Измерение активного сопротивления методом вольтметра и амперметра	215
10.2.3. Измерение емкости методом вольтметра и амперметра	217
10.2.4. Электронный омметр	217
10.3. Мостовые методы измерения параметров элементов	219
10.3.1. Мосты постоянного тока	220
✶ 10.3.2. Мосты переменного тока	220
✶ 10.3.3. Трансформаторные мосты	224
10.4. Цифровые измерители параметров элементов электрических цепей	225
10.4.1. Метод дискретного счета	225
10.4.2. Метод уравнивающего преобразования	227
10.5. Резонансный метод измерения параметров конденсаторов и катушек индуктивностей	228
Контрольные вопросы и задания	229
Глава 11. Анализаторы спектра сигналов	231
11.1. Общие сведения о спектрах сигналов	231
11.2. Фильтровые анализаторы спектра	233
11.2.1. Анализаторы спектра последовательного типа с перестраиваемым фильтром	234
11.2.2. Фильтровые гетеродинные анализаторы спектра последовательного типа	235
11.3. Цифровые анализаторы спектра (ЦАС)	239
11.3.1. Цифровой анализатор со сжатием сигнала во временной области	240
11.3.2. Анализаторы на цифровых фильтрах	240
11.3.3. Анализаторы спектра на основе дискретного преобразования Фурье	241
11.4. Измерение параметров спектра сигнала	243
11.4.1. Измерение параметров АМ сигналов	243
11.4.2. Измерение параметров частотной модуляции	245
11.4.3. Измерение нелинейных искажений	247
Контрольные вопросы и задания	249
Глава 12. Измерение уровней передачи, рабочего затухания и рабочего усиления	250
12.1. Уровни передачи и их измерения	250
12.2. Рабочее затухание четырехполюсников и его измерение	253
12.2.1. Метод разности уровней с использованием известного генератора	255
12.2.2. Метод разности уровней с использованием схемы Z	256
12.2.3. Метод сравнения с использованием известного генератора	257
12.2.4. Метод сравнения с использованием схемы Z	258
12.3. Особенности измерения рабочего усиления четырехполюсников	259

Контрольные вопросы и задания	261
Глава 13. Измерение электрической мощности и шумовых параметров радиоэлектронных устройств	262
13.1. Общая характеристика методов измерения мощности	262
13.2. Методы измерения мощности	266
13.2.1. Электромеханический метод	266
13.2.2. Метод амперметра и вольтметра	267
13.2.3. Метод перемножения	269
13.2.4. Калориметрический метод	270
13.2.5. Метод терморезистора	272
13.2.6. Термоэлектрический метод	275
13.2.7. Метод измерения проходящей мощности на основе использова-	
ния направленных ответвителей	276
13.2.8. Пондеромоторный метод измерения проходящей мощности	277
13.2.9. Метод, основанный на эффекте Холла	279
13.3. Измерение шумовых параметров радиоэлектронных устройств	280
13.3.1. Шумовые параметры радиоэлектронных устройств	280
13.3.2. Измерение шумовых параметров методом двух отсчетов	282
Контрольные вопросы и задания	285
Глава 14. Измерение фазового сдвига и фазового дрожания цифрового сигнала	286
14.1. Измерение фазового сдвига	286
14.1.1. Основные понятия и определения	286
14.1.2. Осциллографический метод измерения фазового сдвига	287
14.1.3. Компенсационный метод измерения фазового сдвига	289
14.1.4. Метод преобразования фазового сдвига во временной интервал	290
14.1.5. Метод дискретного счета	291
14.2. Измерение группового времени запаздывания	293
14.3. Измерение фазового дрожания цифрового сигнала	293
Контрольные вопросы и задания	296
Глава 15. Автоматизация измерений	297
15.1. Общая характеристика средств и проблемы автоматизации измерений	297
15.2. Принцип построения информационно-измерительных систем и классификация интерфейсов	300
15.3. Стандартные интерфейсы для измерительных систем	305
15.3.1. Стандартный интерфейс МЭК 625.1	306
15.3.2. Стандартный интерфейс КАМАК	310
15.3.3. Стандартный интерфейс VXI	312
15.4. Виртуальные приборы и компьютерные измерительные системы	313
Контрольные вопросы и задания	316

Часть III. ОСНОВЫ КВАЛИМЕТРИИ, ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИИ

Глава 16. Оценивание и поддержание качества продукции ...	318
16.1. Основные понятия, показатели и критерии, используемые при оценивании качества	318
16.2. Методы определения показателей и оценивания уровня качества продукции	323
16.3. Оценивание и поддержание качества продукции на стадии ее эксплуатации	333
16.3.1. Линейно-верная модель	342
16.3.2. Линейно-равномерная модель	343
16.3.3. Линейная модель с двумя случайными коэффициентами	344
Контрольные вопросы и задания	346
Глава 17. Техническое регулирование, стандартизация и сертификация	347
17.1. Общие положения, принципы технического регулирования и технические регламенты	347
17.2. Основы стандартизации	350
17.3. Основы сертификации	355
Контрольные вопросы и задания	359
Литература	360
Приложения	364

ВЫШЛИ В СВЕТ И ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ:

Анцыферов С. С., Голубь Б. И. **Общая теория измерений: Учебное пособие** / Под редакцией академика РАН Н. Н. Евтихьева. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 176 с: ил., ISBN 5-93517-271-2.

Изложены основные положения теоретической метрологии. Рассмотрены методы выявления, оценки и аппроксимации погрешностей результатов измерений. Рассмотрены методы обработки динамических измерений, спектрального анализа и случайных процессов. Основное внимание уделено вопросам математического обеспечения методов обработки результатов многократных измерений и их систематизации.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 653800 – «Стандартизация, сертификация и метрология», может быть полезна специалистам.

Голубь Б. И., Котюк А. Ф., Кузин А. Ю. **Основы обеспечения единства оптико-физических измерений.** – М.: Горячая линия–Телеком, 2005. – 151 с.: ил., ISBN 5-93517-235-6.

Приведены основы обеспечения единства оптико-физических измерений величин, характеризующих некогерентное и когерентное оптические излучения. Особое внимание уделено методам и средствам воспроизведения единиц и передачи их размеров в спектрометрии, фотометрии, колориметрии, спектрофотометрии, поляриметрии, а также изменениям величин, характеризующих непрерывное и импульсное лазерные излучения.

Для инженерных и научных работников в области техники оптических измерений, будет полезна студентам, обучающимся по направлениям 653800 – «Стандартизация, сертификация и метрология», 654000 – «Опготехника», а так же при подготовке бакалавров и магистров по направлению 552200 – «Метрология, стандартизация и сертификация».

Загидуллин Р. Ш. **LabView в исследованиях и разработках.** – М.: Горячая линия–Телеком, 2005. – 352 с.: ил., ISBN 5-93517-211-9.

Приведена информация об использовании пакета LabView как в области моделирования различных объектов, так и в качестве средства для работы с внешними устройствами, подключенными к персональному компьютеру через последовательные порты, шины ISA и PCI. Рассмотрены язык программирования G и конкретные примеры решения задач сопряжения внешних устройств с персональным компьютером и обработки полученных данных средствами LabView. Представлены программы для работы со стандартными приборами (мультиметрами) через последовательный порт, с платами, выпускаемыми отечественными разработчиками (ЗАО «Компания Сигнал» и ЗАО «L-CARD»), даны конкретные примеры решения задач обработки сигналов, полученных от этих устройств. Приведена информация об использовании звуковой карты персонального компьютера в качестве генератора и осциллографа для решения простых задач в лаборатории разработчика и исследователя.

При подготовке книги использован опыт автора по использованию пакета LabView в процессе обучения студентов МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для инженерно-технических работников, работающих в области автоматизации проектирования электронной аппаратуры, будет полезна студентам и аспирантам.

Качество услуг мобильной связи. Оценка, контроль и управление
/ В. Ю. Бабков, П. В. Полинцев, В. И. Устюжанин; под ред. профессора
А. А. Гоголя. – М.: Горячая линия–Телеком, 2005. – 160 с.: ил.,
ISBN 5-93517-282-8.

Рассмотрены вопросы стандартизации качества услуг мобильной связи в России и за рубежом. Приведены критерии и методики оценки качественных показателей обслуживания абонентов в сетях мобильной связи. Изложены вопросы управления качеством обслуживания.

Для специалистов в области телекоммуникаций, будет полезна студентам и аспирантам, обучающимся в вузах связи.

Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под редакцией А. М. Рембовского. – М: Горячая линия–Телеком, 2006. – 492 с: ил., ISBN 5-93517-326-3.

Рассмотрены типовые задачи, решаемые с помощью средств радиомониторинга, получивших широкое применение в самых различных областях – от управления использованием радиочастотного спектра (РЧС) до контроля радиообстановки при проведении контртеррористических операций. Изложены вопросы построения и функционирования радиотехнических систем, предназначенных для радиомониторинга и контроля эффективности мероприятий по технической защите информации, начиная от характеристик и структурных схем радиоэлектронных устройств, входящих в состав сложных систем, до описания принципов их функционирования. Рассмотрены методы, алгоритмы и особенности программного обеспечения, используемые для решения таких типовых задач радиомониторинга, как выявление и анализ радиоизлучений при идентификации источников сигналов и помех, измерение параметров сигналов и помех, оценка их опасности или ценности для пользователя, измерение напряженности электромагнитного поля или плотности потока мощности, определение положения источников радиосигналов и радиопомех на местности. Приведены примеры их использования в сложной помеховой обстановке в промышленных центрах, внутри зданий и на открытой местности. Теоретические рассуждения поясняются примерами конкретных разработок радиоэлектронных устройств и радиосистем пеленгования, измерения параметров, идентификации и локализации источников электромагнитного поля, выполненных под руководством и при участии авторов.

Для специалистов в области радиомониторинга, операторов и руководителей радиоконтрольных служб, сотрудников силовых ведомств и служб безопасности государственных и коммерческих структур, может быть полезна студентам и аспирантам.

Справки по телефону: (495) 737-39-27, e-mail: radios_hl@mtu-net.ru
WWW.TECHBOOK.RU.

Заказать книги *наложенным платежом* можно, выслав почтовую открытку или письмо по адресу: 107113, Москва, а/я 10, «Dessy»; тел. (495) 304-72-31
или по электронной почте: post@dessy.ru.

Книги издательства «Горячая линия – Телеком»

можно заказать через почтовое агентство DESSY: 107113, г.Москва, а/я 10,
а также интернет-магазин: www.dessy.ru

**С. И. Боридько, Н. В. Дементьев,
Б. Н. Тихонов, И. А. Ходжаев**

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах

Рассмотрены основы метрологии, методы и средства электро-радиоизмерений, вопросы квалиметрии, стандартизации и оценивания соответствия. Рассмотрены вопросы автоматизации измерений, а также оценивание и поддержание качества радиоэлектронных изделий в процессе эксплуатации

Материал соответствует требованиям действующих нормативных документов в области метрологии, стандартизации, сертификации и технического регулирования, а также современным тенденциям развития теории измерений и измерительной техники.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 090106 (075600) – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем». Может быть полезно студентами, обучающимися по направлениям «Телекоммуникации» и «Радиотехника» и специалистам.

Сайт издательства:

www.techbook.ru

ISBN 5-93517-338-7



9 785935 173388