
МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

Под редакцией
профессора **В.И.Нефедова**

Допущено
Министерством образования
Российской Федерации
в качестве учебника
для студентов
высших учебных заведений,
обучающихся по направлению
подготовки
дипломированных специалистов
«Радиотехника»



МОСКВА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»
2003

УДК 621.37
ББК 32.842
М 54

Авторы:

В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков, Е.В. Федорова, Е.К. Белянина

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. А.В. Прохоров
(Московский государственный технический университет гражданской авиации);
кафедра «Информационных систем и измерительных технологий»
Московского государственного открытого университета
(зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Г.Г. Раннев)

**Метрология и радиоизмерения: Учебник для вузов/В.И. Нефедов,
М 54 В.И. Хахин, В.К. Битюков и др./Под ред. профессора В.И. Нефедо-
ва. — М.: Высш. шк., 2003. — 526 с.: ил.**

ISBN 5-06-004427-0

В учебнике рассмотрены основы метрологии, методы и средства измерений электрических величин, а также вопросы стандартизации и сертификации изделий радиоэлектроники. Материал представлен с учетом современных достижений и тенденций развития теории измерений и измерительной техники. Изложение базируется на действующей нормативно-технической документации и рекомендациях международных организаций в области метрологии, стандартизации и сертификации.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Радиотехника», и одноименной специальности. Учебник будет полезен студентам других технических специальностей, а также инженерно-техническим работникам и аспирантам.

УДК 621.37
ББК 32.842

ISBN 5-06-004427-0

© ФГУП «Издательство «Высшая школа», 2003

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа», и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

x_n – истинное значение измеряемой величины	P – вероятность
x – результат измерения	P_d – доверительная вероятность
Δ – абсолютная погрешность	$p(x)$ – закон распределения плотности вероятности
δ – относительная погрешность	$p_n(t)$ – нормированный нормальный закон распределения
γ – приведенная погрешность	m_1 – математическое ожидание
Δ_c – систематическая погрешность	$\tilde{m}_1 = \tilde{x} = \tilde{A}$ – оценка математического ожидания (результат измерения)
Δ_{ci} – частная систематическая погрешность	σ – среднее квадратическое отклонение (СКО)
Δ – случайная погрешность	$\tilde{\sigma}$ – оценка СКО наблюдений
Δ_i – частная случайная погрешность	$\tilde{\sigma}_{cp} = S(\tilde{A})$ – оценка СКО результата измерений
Δ_m – максимальная (предельная) погрешность	$\tilde{\sigma}^*$ – смещенная оценка СКО наблюдений
d – аддитивная относительная погрешность прибора	S_Σ – оценка суммарного СКО результата измерения
c – суммарная относительная погрешность прибора	$\Delta_{си}$ – предел допускаемой абсолютной основной погрешности прибора
$\Delta(\tilde{A})$ – оценка погрешности результата косвенного измерения	$\delta_{си}$ – предел допускаемой относительной основной погрешности прибора
$\Delta_c(\tilde{A})$ – систематическая составляющая погрешности результата косвенного измерения	$\gamma_{си}$ – предел допускаемой приведенной основной погрешности прибора
$\Delta(\tilde{A})$ – случайная составляющая погрешности результата косвенного измерения	D – дисперсия
Δ_{r1}, Δ_{r2} – нижняя и верхняя границы интервала погрешностей	$\Psi(z)$ – интеграл вероятностей
X_N – нормирующее значение	$\Phi(z)$ – функция Лапласа
X_k – конечное значение шкалы	$F(x)$ – интегральный закон распределения
	$t(P_\lambda, n)$ – коэффициент Стьюдента
	$S(\omega)$ – спектральная плотность

$\Gamma\left(\frac{n}{2}\right); \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)$ – гамма-функции (интегралы Эйлера)
 q – уровень значимости ошибки
 $\bar{E}$ – напряженность электрического поля
 $\tilde{d}$ – квантиль нормального распределения
 θ – общая граница неисключенных систематических погрешностей
 Q – добротность контура
 B – индукция
 ε – доверительная граница случайной погрешности результата измерений
 $\tilde{r}_{ij}$ – оценка коэффициента корреляции
 S – чувствительность средств измерений
 $R(\tau)$ – корреляционная функция
 $H(x)$ – безусловная энтропия
 $H(x/x_n)$ – условная энтропия
 I – количество информации
 k_3 – энтропийный коэффициент
 Δ_3 – энтропийное значение погрешности
 A_n, A_n – нижняя и верхняя границы доверительного интервала
 $\tilde{x} - \Delta_r, \tilde{x} + \Delta$ – доверительный интервал
 K_r – коэффициент гармоник
 M – коэффициент амплитудной модуляции; коэффициент взаимной индуктивности катушек
 $u(t)$ – аналоговый (непрерывный) сигнал
 $u_r(t)$ – дискретный сигнал
 $u_d(t)$ – цифровой сигнал
 U_m – амплитуда гармонического напряжения
 U_m^+, U_m^- – положительное и отрицательное амплитудные значения
 U – среднее квадратическое значение напряжения
 U_{cp} – среднее значение напряжения

$U_{cp, \text{в}}$ – средневывравленное значение
 K_a – коэффициент амплитуды
 K_ϕ – коэффициент формы
 $\delta(t)$ – дельта-функция
 Ψ_0 – удельное потокосцепление
 β – коэффициент передачи цепи обратной связи
 $F_{пч}$ – промежуточная частота
 Δf – полоса пропускания
 S_r – чувствительность осциллографической трубки
 v – скорость движения луча трубки по экрану
 $\Delta t_n, \Delta t_k$ – погрешности дискретизации начала и конца измеряемого интервала времени
 Δt_d – общая погрешность дискретизации измеряемого интервала времени
 $T_{сч}$ – время счета
 $T_{оп}$ – время опроса
 f – циклическая частота
 ω – угловая частота
 Ω – угловая частота модуляции
 φ – начальная фаза
 $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг
 $\cos\varphi$ – косинус угла между двумя гармоническими колебаниями
 $E_{\min}, E_{\max}$ – соответственно минимальная и максимальная амплитуды смешанной волны
 $\dot{\Gamma}$ – комплексный коэффициент отражения
 $K_{6в}$ – коэффициент бегущей волны
 $K_{св}$ – коэффициент стоячей волны
 $W_X(\omega)$ – спектральная плотность мощности
 ρ – характеристическое сопротивление; волновое сопротивление
 $M_{вp}$ – вращающий момент
 $\operatorname{tg}\delta_x$ – тангенс угла потерь конденсатора

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Бурный прогресс в области радиотехники привел к тому, что подавляющее число измерений приходится проводить современными приборами с использованием компьютеров, а обработку их результатов с помощью теории вероятности и методов математической статистики. Поэтому главная цель учебника — изложить новейшие основы теории и практики измерений.

Тематически учебник «Метрология и радиоизмерения» предназначен для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированного специалиста 654200 — Радиотехника, специальностям: 200700 — Радиотехника, 201400 — Аудиовизуальная техника, 201500 — Бытовая радиоэлектронная аппаратура, 201600 — Радиоэлектронные системы, 201700 — Средства радиоэлектронной борьбы и 071500 — Радиофизика и электроника. Однако его могут использовать студенты других специальностей радиотехнического профиля. Книга будет также полезна студентам, аспирантам и инженерам смежных с радиотехникой специальностей, которым необходимо получить первоначальную подготовку в области современной метрологии и измерений.

В отличие от большинства учебных источников, где основное внимание уделено *изложению* дисциплины, в этом учебнике акцент перенесен на *объяснение* предмета. Он может быть интересен еще и тем, что многие аспекты в нем смещены в область цифровой измерительной техники, что отражает современные тенденции в развитии средств измерений. В учебнике рассмотрены также весьма актуальные вопросы стандартизации и сертификации.

Учебник написан преподавателями кафедры радиоприборов факультета радиотехнических систем Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета). Материал включает шестнадцать взаимосвязанных глав, обеспечивающих необходимый уровень подготовки специалистов в области радиотехники по метрологии и радиоизмерениям.

Введение, гл. 10, 11, 13 и заключение написаны В.И. Нефедовым; гл. 2, 3, 8, приложения 3 и 4 — совместно В.И. Нефедовым и В.И. Хахиным; гл. 6, 12, 14, 15 — совместно В.И. Нефедовым и В.К. Битюковым; гл. 5 — совместно Е.В. Федоровой, В.И. Нефедовым и Е.К. Беляниной; гл. 9 — В.И. Хахиным; гл. 1, 4, 7, 16, приложения 1 и 2 — всем коллективом авторов.

От коллектива авторов и от себя лично выражаю глубокую признательность ректору Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета) профессору А.С. Сигову. Только его многосторонняя помощь и деликатная настойчивость позволила завершить работу над столь объемным материалом.

С нескрываемым удовольствием отмечаю громадную работу профессора Г.Г. Раннева, который взял на себя нелегкий труд по рецензированию учебника. В процессе рецензирования им был высказан ряд ценных замечаний, несомненно, улучшивших учебник. Считаю своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность профессору А.В. Прохорову, предложившему множество улучшений в этой книге. Много полезных советов, которые невозможно переоценить, внесли профессора А.А. Парамонов и В.М. Свистов.

Авторы благодарны всем, кто был столь любезен, найдя возможность внимательно прочесть рукопись учебника. Велика роль преподавателей и аспирантов кафедры радиоприборов и других кафедр факультета радиотехнических систем МИРЭА, с которыми мы общались в течение многих лет педагогической деятельности. При работе над книгой были учтены и отзывы специалистов научных учреждений и промышленных предприятий радиотехнического профиля. Тем не менее, мы готовы с признательностью принять конструктивную критику, предложения и пожелания, которые конечно будут отражены в следующих изданиях книги, если таковые последуют.

Замечу, что это практически первый учебник такого уровня, основанный на новых метрологических терминах и определениях, введенных в действие с 1 января 2001 г. Рекомендацией по межгосударственной стандартизации ПМГ 29–99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения».

Поскольку переход на новые нормативные документы в Российской Федерации еще не завершен, редактор решил не давать по тексту ссылки на вновь принятые и устаревшие стандарты, рекомендации, руководящие документы и правила. Практически все наименования новых документов, имеющих на время издания учебника, а по существу это документы за последние 10...12 лет, приведены в приложении.

При подготовке учебника к публикации издательством и мною было приложено много усилий к тому, чтобы устранить замеченные погрешности и опечатки в тексте, рисунках и формулах. Однако нет полной гарантии в том, что в достаточно сжатые сроки подготовки книги в ее материалах не было что-либо упущено и даже неверно истолковано. Если внимательный читатель обнаружит неточности в книге, то я, как редактор, полностью беру на себя моральную ответственность за эти упущения.

Авторы с глубокой признательностью примут любые замечания и пожелания читателей, которые просят присылать по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

В. Нефедов

Неверные веса — мерзость пред Господом,
но правильный вес угоден Ему.
Библия

ВВЕДЕНИЕ

Познание человеком окружающего мира неразрывно связано с наблюдениями и экспериментами. Получение информации в процессе наблюдений и экспериментов базируется на измерениях. В том или ином виде измерения зародились с появлением человека на Земле. Установлено, что более чем за четыре тысячелетия до новой эры (Рождества Христова) в Вавилоне и Египте уже проводили астрономические измерения. На протяжении всей истории развития науки и техники перед человеком возникало и возникает множество проблем, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объектов материального мира (явлении, процессе, теле, веществе, изделии и пр.). Основным способом получения такой информации являются *измерения*, при правильном выполнении которых находится результат измерения с большей или меньшей точностью, отражающий интересующие свойства объекта познания.

Измерения играют важнейшую роль в жизни человека и являются начальной ступенью познания, которые часто не превышают уровня эмпирических. Поскольку критерием истины всегда служит практика (эксперимент), результаты измерений очень часто выступают в качестве критерия истины. Измерения делают представления о свойствах окружающего нас мира более полными и понятными. Можно сказать, что прогресс науки и техники определяется степенью совершенства измерений и измерительных приборов. Итак, измерения служат источником нашего научного и практического познания. По этому поводу великий М. Планк сказал: «В физике существует только то, что можно измерить».

Основы отечественной метрологии заложил русский ученый Д. И. Менделеев (1834 — 1907). Он так определял роль и значение измерений: «В природе мера и вес суть главное орудие познания. Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука немыслима без меры». Зарождение в нашей стране *метрологической службы* следует отнести к 1842 г., в котором был издан закон о мерах и весах, предусматривающий создание первого в России метрологического учреждения — *Депю образцовых мер*. В 1893 г.

Д. И. Менделеев основал *Главную палату мер и весов*, в задачи которой входило не только хранение *эталонов* и обеспечение *поверки* по ним средств измерений, но и проведение научных исследований в области метрологии. Затем в стране стали создаваться местные поверочные палаты.

История развития техники *электрических измерений* связана с именами русских ученых М.В. Ломоносова и Г.В. Рихмана, которые в 40-х годах XVIII века сконструировали первый в мире электроизмерительный прибор, названный авторами *указатель электрической силы*.

Во второй половине XVIII — первой половине XIX в. выдающиеся ученые (Вольт, Кулон, Ом, Фарадей и др.) продолжили создание других видов приборов. В частности, закон Ома был открыт при наблюдении взаимодействия провода с током, расположенного рядом с магнитной стрелкой, — прообраза современных приборов магнитоэлектрической системы. С помощью этого устройства М. Фарадей установил закон электромагнитной индукции (1826 — 1831). Во второй половине XIX в. существенный вклад в развитие электроизмерительных приборов внесли русские ученые А.Г. Столетов, Б.С. Якоби и особенно М.О. Доливо-Добровольский, предложивший электромагнитные и ряд других приборов.

Первые измерительные приборы использовались лишь для относительной оценки физической величины. Такое положение сохранялось до тех пор, пока не были определены электрические меры. Вначале (середина XIX в.) эти меры, созданные отдельными учеными в разных странах, не были одинаковыми. Однако это позволяло все же производить измерения, хотя еще и не в общепринятых единицах, и сделало возможным взаимное сличение этих мер и сравнение результатов опытов.

В 1875 г. по взаимной договоренности на специальной международной конференции с участием России была подписана метрическая конвенция, по которой страны обязались содержать «Международное бюро мер и весов» как центр, обеспечивающий единство измерений в международном масштабе. При этом в широком смысле под *единством измерений* понимается характеристика качества измерений, заключающаяся в том, что их результаты выражаются в законных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам воспроизведенных величин, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. Применительно к нашей стране, согласно Закону Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений», *единство измерений* — состояние измерений, при котором их результаты выражены в законных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

На международных конгрессах по электричеству (1881 г. — Париж и 1893 г. — Чикаго) была принята применяющаяся и до нашего времени практическая система электрических и магнитных единиц, базирующаяся на международных единицах ампера и ома.

Внедрение техники измерений совпало с началом развития систем радиосвязи и радиотехники. Существенное внимание данным вопросам уделял крупнейший русский ученый, изобретатель радио А.С. Попов. Основоположником отечественной радиоизмерительной техники считается академик М.В. Шулейкин, организовавший в 1913 г. первую заводскую лабораторию по производству измерительных приборов. Большой вклад в развитие техники измерений внес академик Л.И. Мандельштам, создавший в начале XX в. прототип современного электронного осциллографа. Многие русские ученые, такие, как М.А. Бонч-Бруевич, В.В. Ширков, Н.Н. Пономарев, В.Г. Дубенецкий и другие, существенно развили теорию и технику радиоизмерений.

Студенты радиотехнических специальностей, начиная уже с первого семестра, выполняют лабораторные работы на общетехнических и специальных кафедрах. При этом в основе большинства лабораторных работ лежат измерения. Результаты любых измерений, как бы тщательно они ни выполнялись, неизбежно содержат некоторые погрешности. Поэтому успешная работа студентов в лабораториях наряду с изучением средств и методов измерений и приобретением навыков измерений предполагает также их знакомство с современными методами математической обработки результатов измерений, анализа и оценивания погрешностей.

Готовясь к самостоятельной работе по избранной специальности, студенты должны иметь в виду, что измерения пронизывают все сферы инженерного труда. С измерениями связана деятельность инженеров, работающих по профилям исследователей, конструкторов, технологов и т. д. Инженер непременно должен иметь ясное представление о возможностях измерительной техники, чтобы обеспечить взаимозаменяемость изделий, устройств и узлов радиоэлектронной техники. Поэтому знание современных стандартов, правил, норм и требований в области измерений также обязательны для специалистов, занимающихся управлением и организацией производства.

Чтобы успешно справиться с многочисленными и разнообразными проблемами радиоизмерений, необходимо освоить ряд общих принципов их решения, определить единую научную и законодательную базу, обеспечивающую на практике высокое качество измерений независимо от того, где и с какой целью они выполняются. Такой базой является *метрология* (от греческих слов «метрон» — мера, «логос» — учение).

Современное определение метрологии дано в Рекомендации ПМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения»: *метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.*

Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью. Средства метрологии — это совокупность средств измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

Основоположник классификации наук академик Б.М. Кедров предложил понятие треугольника наук, «вершинами» которого являются философские, естественные и социальные науки. Основная цель метрологии — познание окружающего нас мира. В этом ее связь с философией. Метрология относится к точным наукам — в этом ее связь с математикой как наукой естественной. Измерения проводятся не только в технике, измерениями занимаются и психологи, и социологи, и представители многих других направлений, не относящихся к «точным» наукам. Так, широко распространенную в психологии оценку умственного развития человека называют *измерением интеллекта*. В этом связь метрологии с социальными науками. Метрологию с этой точки зрения можно поместить на любой стороне упомянутого треугольника.

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

Наряду с метрологией проблемами создания и применения средств измерений для получения измерительной информации и возникающими при этом научными и техническими вопросами занимается измерительная техника. Фундаментальной основой измерительной техники является метрологическое обеспечение. Метрологическое обеспечение любых измерений в целом покоится, как здание на фундаменте, на четырех краеугольных камнях (рис.1), а именно: научной, нормативно-технической, организационной и правовой (законодательной) основах.

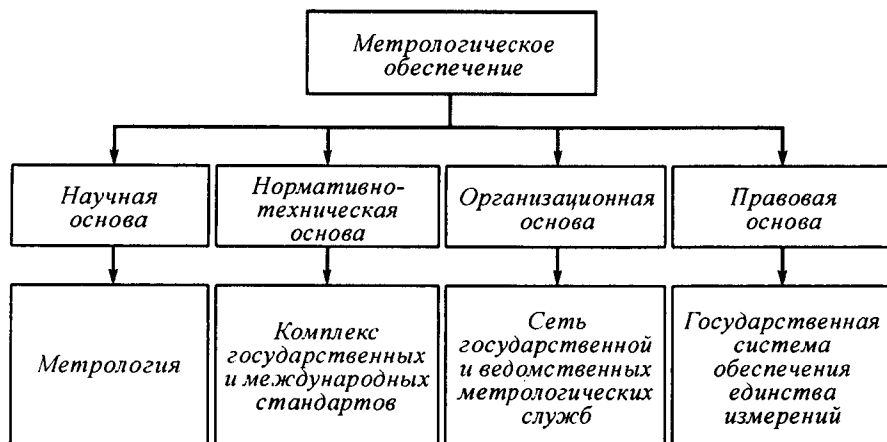


Рис. 1. Структура метрологического обеспечения измерений

Для руководства всей деятельностью и поддержания единства измерений в России создана мощная метрологическая служба, состоящая из Государственной службы, возглавляемой Государственным комитетом по стандартам (Госстандартом Российской Федерации), и ведомственных служб во всех отраслях народного хозяйства.

Метрология делится на три самостоятельных и в то же время достаточно взаимосвязанных раздела: научную, законодательную и прикладную.

Научная (теоретическая) метрология, являясь базой измерительной техники, занимается изучением проблем измерения в целом и образующих измерение элементов: средств и приборов измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и пр.

Нормативно-технической основой метрологического обеспечения является комплекс государственных стандартов:

- система государственных эталонов единиц физических величин;
- система передачи размеров единиц физических величин от эталонов или исходных образцовых средств измерений нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений;
- система разработки, постановки на производство и выпуска в обращение средств измерений, обеспечивающих определение с требуемой точностью характеристик продукции, технологических процессов и других объектов в сфере материального производства, при научных исследованиях и других видах деятельности;
- система обязательных государственных испытаний средств измерений;
- система обязательной государственной и ведомственной поверки или метрологической аттестации средств измерений;
- система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, обеспечивающая воспроизведение единиц величин, характеризующих состав и свойства веществ и материалов;
- система стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;
- общие методы нормирования оценки и контроля метрологических характеристик средств измерений.

Организационной основой метрологического обеспечения является метрологическая служба Российской Федерации. Она состоит из государственной и ведомственных метрологических служб, образующих покрывающую всю страну сеть учреждений и организаций, возглавляемых Госстандартом РФ. В своей работе она базируется на основных положениях законодательной метрологии.

Важной особенностью метрологического обеспечения является ее правовая основа. Благодаря действию в нашей стране комплекса государственных стандартов, объединенных в *Государственную систему обеспечения*

единства измерений (ГСОЕИ, упрощенное — ГСИ), установлена единая номенклатура стандартных взаимоувязанных правил и положений, требований и норм, относящихся к организации и методике оценивания и обеспечения точности измерений. Ряд таких положений установлен отечественным стандартом ГОСТ Р 8.000-2000. «ГСИ. Основные положения».

Раздел метрологии, включающий комплексы взаимосвязанных общих правил, требований и норм, а также вопросы регламентации и государственного контроля, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений, называется *законодательной метрологией*. Это, в свою очередь, предписывает соответствующий надзор за средствами измерений, который осуществляется деятельностью органов метрологической службы, обеспечивающей единообразие средств измерений. В метрологии, как и в любой другой науке, недопустимо произвольное толкование применяемых терминов. Поэтому один из основных метрологических документов Рекомендация ПМГ 29–99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» специально регламентирует терминологию в области метрологии.

Прикладная метрология посвящена вопросам практического применения результатов теоретических исследований в различных сферах деятельности.

В настоящее время широкое применение в метрологии получила *квалиметрия* — учение о методах и приемах измерения (точнее, оценивания) качества. Методологическая общность классической метрологии, сертификации и квалиметрии делает обоснованным не выделять квалиметрию в отдельный раздел, а изложить ее элементы в рамках данного курса.

Следует обратить внимание на то, что на этапе современной научно-технической революции в метрологии, и в частности в радиоизмерительной технике, происходят значительные качественные изменения. Измерения практически полностью переходят на цифровые методы, воплощенные в приборах с цифровым отсчетом и регистрацией; существенно расширяются диапазоны измеряемых величин; в измерительных системах широко применяется аналоговая и цифровая микроэлектроника; возникла необходимость в измерении характеристик случайных процессов. Все это требует нового подхода к состоянию средств радиоизмерений, к соответствию их метрологических свойств установленным нормам.

Студентам, аспирантам и специалистам радиотехнического профиля необходимо учитывать то, что в последние годы сформировалось и успешно развивается новое направление в метрологии и радиоизмерительной технике — *компьютерно-измерительные системы* (КИС) и их разновидность — *виртуальные приборы* — Virtual Instruments (виртуальный — кажущийся).

Виртуальный прибор — это специальная плата, устанавливаемая в персональный компьютер (в слот ISA или PCI) или внешнее устройство, подключаемое через LPT-порт в комплексе с соответствующим программным обеспечением. В зависимости от используемой платы и программного обес-

печения пользователь получает измерительный прибор под ту или иную метрологическую задачу. Совершенно очевидно, что многие метрологические и исследовательские задачи будут в XXI в. решаться с помощью компьютерно-измерительных систем и виртуальных приборов.

Учебник написан в предположении, что студенты, приступая к изучению курса «Метрология и радиоизмерения», имеют достаточно хорошую теоретическую и практическую подготовку по следующим дисциплинам: «Высшая математика», «Физика», «Информатика». В свою очередь, этот курс является базовым для дисциплин «Основы теории цепей», «Электродинамика и распространение радиоволн», «Радиоавтоматика», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Цифровые устройства и микропроцессоры», а также ряда специальных дисциплин, изучаемых студентами позднее.

В последние годы в вузовских учебных планах по многим специальностям появились вопросы, связанные с проблемами стандартизации и сертификации. Стандартизация как дисциплина, представленная в учебнике, органически связана с большинством дисциплин, изучаемых в институте. Сертификация продукции и услуг стала обязательной. Она рассматривается как официальное подтверждение качества и во многом определяет конкурентоспособность продукции, а значит и развитие производства, его рентабельность и эффективность. Поэтому в учебнике введена глава, посвященная сертификации.

В заключение отметим, что современное состояние радиоизмерений и перспектива их развития предъявляют повышенные требования к уровню метрологической подготовки радиоинженеров. В соответствии с *общими требованиями к образованности инженера* (квалификационной характеристики) студенты должны:

- изучить основные принципы, методы и средства измерения электрических и радиотехнических величин;
- научиться метрологически и технически правильно выбирать измерительную аппаратуру;
- уметь проводить измерения, обрабатывать их результаты и оценивать достигнутую точность;
- ознакомиться с положениями «Государственной системы обеспечения единства измерений» и перспективными направлениями и тенденциями развития *метрологии и радиоизмерений*.

Учитывая, что основную нагрузку в курсе все же несет раздел «Радиоизмерения», метрологическая подготовка студентов должна быть непрерывной и предусматривать получение метрологических знаний, умений и навыков на всех этапах обучения. На это в большей степени ориентирован данный учебник, который спланирован как основная учебная литература по курсу «Метрология и радиоизмерения» и дополнительная по другим дисциплинам для радиотехнических специальностей.

ЧАСТЬ I

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

Развитие новых направлений радиотехники, бурный рост радиоэлектронной промышленности, повсеместное внедрение компьютеров, автоматизация производства и сферы потребления невозможны без совершенствования измерительной техники и повышения эффективности ее метрологического обеспечения, создания новых методов измерений и средств контроля. На всех этапах исследования, разработки, производства и эксплуатации радиотехнических устройств работа инженеров связана с большим числом измерений различных величин. От того, насколько правильно и быстро проводятся измерения, зависят сроки разработки, качественные показатели и надежность аппаратуры, а также затраты на ее создание и использование.

1.1. Общие сведения

Качественно новое развитие различных направлений радиотехники предъявляет все более высокие требования к метрологическому обеспечению и уровню радиоизмерений. В этой связи для метрологии характерны:

- повышение точности измерений и расширение пределов измеряемых величин;
- разработка современных методов измерений и приборов с использованием новейших физических принципов или радиотехнологий, необходимых для перспективных направлений науки и техники;
- создание автоматизированных измерительных систем, обладающих высокой точностью, быстродействием и надежностью.

Главные задачи радиотехники связаны с передачей, приемом, обработкой и преобразованием информации. Поэтому для радиоизмерений характерно исследование колебаний весьма широкого диапазона частот, при этом очень важно бывает не только определить значения измеряемых величин, но и получить данные о форме и спектре исследуемых сигналов.

Основные особенности, характерные для техники радиоизмерений

1. Чрезвычайно широкий диапазон измеряемых величин, например по мощности — от долей микроватт до сотен киловатт, по напряжению — от

долей микровольт до сотен тысяч вольт, по частоте — от 10^{-2} Гц до $3 \cdot 10^{12}$ Гц и более, по величине сопротивления — от 10^{-6} Ом до 10^{12} Ом и т. д. Вследствие этой особенности методы измерения одного и того же параметра могут отличаться в зависимости от диапазона частот, на которых производится измерение. От диапазона исследуемых частот зависит даже сам перечень параметров физических величин, подлежащих измерению. Так, если в диапазоне радиочастот обычно измеряется напряжение сигнала, то в диапазоне СВЧ, как правило, измеряется его мощность. При этом геометрические размеры объектов измерения многократно отличаются друг от друга (изделия микроэлектроники и изделия антенной техники).

2. Поскольку основной объект исследования в радиотехнических цепях, устройствах и системах — электрический сигнал — является носителем используемой информации, возникает необходимость наблюдения и исследования формы и спектра электрических колебаний, а также генерирования их копий и образцов. Этим вызвано широкое применение в практике радиоизмерений приборов для наблюдения и регистрации колебаний (осциллографов, анализаторов спектров) и источников электрических колебаний (измерительных генераторов).

3. Из-за сложности структуры современных радиотехнических систем и устройств и большого количества всевозможных параметров, описывающих их работу, характерно разнообразие измерений даже в одном эксперименте, необходимость комплексного их проведения, быстроедействие, точность, а следовательно, автоматизация при современном статистическом характере измерений.

Практически любая схема измерения параметров радиотехнического устройства работает следующим образом. Найденные значения параметров объекта измерения в виде электрических сигналов могут быть представлены прямо на устройстве отображения, т. е. измерены непосредственно. В другом случае эти же электрические сигналы, характеризующие измеряемые параметры объекта, подаются в компьютер. Сюда же заводятся заданные параметры объекта и внешней среды. После обработки по одному из способов сравнения (рассмотрены далее) результирующий сигнал подается на устройство отображения. В последнем случае можно сказать об автоматизированной системе измерения, управляемой компьютером. Очевидно, что точность измерений в этом случае будет значительно выше.

Физические свойства и величины

Любой объект окружающего мира характеризуется своими свойствами. *Свойство* — философская категория, выражающая такую сторону объекта (процесса, явления), которая обуславливает его общность или различие с другими объектами (процессами, явлениями) и обнаруживается в его отношениях к ним. По своей сути свойство — категория качественная. Для коли-

качественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины.

Величина — свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной. Анализ различных величин позволяет разделить их на два вида: идеальные и реальные.

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

Реальные величины, в свою очередь, делятся на физические и нефизические. Физическая величина в общем случае может быть определена как величина, свойственная некоторым материальным объектам (процессам, явлениям, материалам), изучаемым в естественных (физика, химия) и различных технических науках. К нефизическим следует отнести величины, присущие общественным (нефизическим) наукам — философии, социологии, экономике и т. д.

1.2. Физические величины

Физическая величина — свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них. Качественная сторона понятия «физическая величина» определяет «род» величины (например, электрическое сопротивление как общее свойство проводников электричества), а количественная — ее «размер» (сопротивление конкретного исследуемого проводника). Числовое значение результата измерения будет зависеть от выбора единицы физической величины. В частности, в популярном детском мультфильме при измерении длины удава в качестве единицы длины была выбрана длина попугая. Если же за единицу длины выбрать общепринятую единицу — метр, то числовое значение длины удава будет иным, хотя размер его остался прежним. Следует отметить, что размер физической величины существует объективно, независимо от того, определили мы его или не определили.

С развитием науки, техники и разработкой новых технологий измерения охватывают все новые и новые физические величины, существенно расширяются диапазоны измерений, как в сторону измерения сверхмалых значений, так и в сторону очень больших значений физических величин. Практически все радиотехнические величины, методы и средства измерения которых рассматриваются в настоящем курсе, являются характерными примерами физических величин.

Физические величины целесообразно разделить на измеряемые и оцениваемые.

Измеряемые физические величины можно выразить количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения.

Оцениваемые физические величины — величины, для которых по каким-либо причинам не может быть введена единица измерения, и они могут быть только оценены.

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

Оценивание — операция приписывания данной физической величине определенного числа принятых для нее единиц, проведенная по установленным правилам.

Для более детального изучения физических величин их следует каким-либо образом классифицировать, выявив общие метрологические особенности отдельных групп. Одна из возможных, достаточно полных классификаций физических величин приведена на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Классификация физических величин

По видам явлений они делятся на следующие группы:

- *энергетические (активные)*, т. е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии; к ним относятся ток, напряжение, мощность, энергия, заряд; они могут быть преобразованы в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;

- *вещественные (пассивные)*, т.е. описывающие физические и физико-

химические свойства веществ, материалов и изделий из них; из радиотехнических величин — это электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др.; для их измерения необходим вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации; при этом пассивные физические величины преобразуются в активные, которые и измеряются;

- *характеризующие временные процессы*; к этой группе относятся различного вида спектральные и поляризационные характеристики, корреляционные функции и др.

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

По степени условной независимости от других величин данной группы физические величины могут быть *основными, производными и дополнительными*. В настоящее время в наиболее распространенной международной системе СИ используется семь физических величин, выбранных в качестве основных: длина, время, масса, температура, сила электрического тока, сила света и количество вещества. Подробно деление физических величин по этому признаку рассмотрено далее.

По наличию размерности физические величины делятся на *размерные и безразмерные*.

Значение физической величины — оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц измерения. *Числовое значение физической величины* — отвлеченное число, выражающее отношение значения величины к соответствующей единице данной физической величины (например, 10 А — значение силы тока, причем само число 10 — это и есть числовое значение). Именно термин «значение» следует применять для выражения количественной стороны рассматриваемого свойства. Неправильно, например, говорить и писать «величина тока», «величина напряжения» и т. д., поскольку ток и напряжение сами являются величинами (правильным будет применение терминов «значение силы тока», «значение напряжения» и пр.).

Для обозначения частных особенностей физических величин применяют термин *параметр*. Например, конденсатор характеризуют емкостью, а его параметрами можно считать тангенс угла потерь, температурный коэффициент емкости, индуктивность вводов. Иногда параметром называют саму измеряемую физическую величину — амплитуду, фазу, частоту.

При выбранной оценке физической величины, как объективно существующим свойством объекта в данный момент времени, ее можно охарактеризовать истинным, действительным и измеренным значениями.

Нахождение истинного значения измеряемой физической величины является главной проблемой метрологии.

Истинным значением физической величины называется значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Определить экспериментально его невозможно вследствие неизбежных погрешностей измерения. *Погрешность измерения* — это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины (подробно о погрешностях — в гл. 2).

Положим, что измеряется диаметр круглого металлического диска. Не вызывает сомнения положение, что измерение диаметра диска можно проводить с все более и более высокой точностью, стоит лишь выбрать средство измерений соответствующей точности. Но когда погрешность средства измерения достигнет размеров молекулы, обнаружится как бы размывание краев диска, обусловленное хаотическим движением молекул. Вследствие этого за некоторым пределом точности само понятие диаметра диска потеряет первоначальный смысл и дальнейшее повышение точности измерения бесполезно. Следовательно, понятие «истинного» значения диаметра в данном случае приобретает вероятностный смысл и можно лишь с определенной вероятностью установить интервал значений, в котором оно находится. Поэтому одним из основных постулатов метрологии является положение о том, что истинное значение физической величины существует, однако определить его путем измерения невозможно.

В связи с тем, что истинное значение физической величины определить невозможно, в практике измерений оперируют понятием действительного значения, степень приближения которого к первому зависит от точности измерительного средства и погрешности самих измерений.

Действительным значением физической величины называется значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него. Для действительного значения физической величины всегда можно указать границы более или менее узкой зоны, в пределах которой с заданной вероятностью находится истинное значение физической величины. Действительное значение физической величины определяют по образцовым мерам и приборам, погрешностями которых можно пренебречь по сравнению с погрешностями применяемых рабочих средств измерения.

Под *измеренным значением* понимается значение величины, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерения.

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

Влияющая физическая величина — физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или на объект измерения таким образом, что это приводит к искажению результа-

та измерения. Например, при измерении параметров транзистора влияющей величиной может быть температура, если параметры зависят от температуры.

В метрологии различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений. *Нормальные условия измерений* — это условия, при которых влияющие величины имеют нормальные или находящиеся в пределах нормальной области значения. *Нормальная область значений влияющей величины* — это область значений, в пределах которой изменением результата измерений под воздействием влияющей величины можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности. Нормальные условия измерений задаются в нормативно-технической документации на средства измерений. *Рабочими* называются условия измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах своих рабочих областей. *Рабочая область значений влияющей величины* — область, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность или изменение показаний средства измерения. *Предельные условия измерений* — условия, характеризуемые экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерения может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

Постоянная физическая величина — физическая величина, размер которой по условиям измерительной задачи можно считать не изменяющимся за время, превышающее длительность измерения.

Переменная физическая величина — физическая величина, изменяющаяся по размеру в процессе измерения

Физический параметр — физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины. Например, при измерении напряжения переменного тока параметром напряжения могут быть его амплитуда, мгновенное, средневывпрямленное или среднее квадратическое значения и пр.

Единица физической величины — физическая величина фиксированного размера, которой по определению условно присвоено стандартное числовое значение, равное единице. Она применяется для количественного выражения однородных физических величин.

Единицы физических величин подразделяются на *основные* и *производные* и объединяются в соответствии с принятыми принципами в *системы единиц физических величин*.

1.3. Международная система единиц

Единица измерения должна быть установлена для каждой из известных физических величин, при этом необходимо учитывать, что многие физические величины связаны между собой определенными зависимостями. Поэтому только часть физических величин и соответственно их единиц могут определяться независимо от других. Такие величины называют *основными*.

Остальные физические величины (к ним относятся дополнительные и производные) определяются с использованием физических законов и зависимостей через основные физические величины.

Совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, называется *системой единиц физических величин*. Единица основной физической величины является *основной единицей* данной системы. Международная система единиц (система СИ; SI — от франц. — *Système International* — The International System of Units) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. На территории нашей страны система единиц СИ установлена соответствующим ГОСТом «ГСИ. Единицы физических величин».

К основным характеристикам системы СИ следует отнести:

- универсальность, т. е. охват всех областей науки и техники;
- унификацию всех областей и видов измерений;
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью в соответствии с их определением с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники;
- когерентность величин;
- упрощение записи формул;
- уменьшение числа допускаемых единиц;
- единую систему образования кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между различными странами.

В основу Международной системы СИ положены семь основных и две дополнительные единицы, приведенные в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Единицы Международной системы СИ

Величины		Единицы		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Основные единицы				
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	канделла	cd	кд
Дополнительные единицы				
Плоский угол	—	радиан	rad	рад
Телесный угол	—	стерадиан	sr	ср

В качестве основных приняты: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и канделла.

Метр равен расстоянию, которое проходит в вакууме плоская электромагнитная волна за $1/299792458$ долю секунды.

Килограмм — единица массы, определяемая как масса международного прототипа килограмма, представляющего собой цилиндр из сплава платины и иридия. Современное развитие науки пока не позволяет с достаточной степенью точности связать килограмм с естественными атомными константами. До сих пор килограмм является *чисто договорной единицей*.

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

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

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

Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц.

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

Дополнительные единицы международной системы СИ предназначены и используются для образования единиц угловой скорости, углового ускорения и некоторых других физических величин. К дополнительным физическим величинам системы СИ относятся плоский и телесный углы.

Угловые единицы не могут быть введены в число основных, так как это вызвало бы затруднение в трактовке размерностей физических величин, связанных с вращением (дуги окружности, площади круга и т. д.).

Радиан — угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна этому радиусу. В практических случаях часто используются такие единицы измерения угловых величин:

$$\text{градус } 1^\circ = 2\pi/360 \text{ рад} = 0,017453 \text{ рад};$$

$$\text{минута } 1' = 1^\circ/60 = 2,9088 \cdot 10^{-4} \text{ рад};$$

$$\text{секунда } 1'' = 1'/60 = 1^\circ/3600 = 4,8481 \cdot 10^{-6} \text{ рад.}$$

Соответственно:

$$1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 45'' = 57,2961^\circ = (3,4378 \cdot 10^3)' = (2,0627 \cdot 10^5)''.$$

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

Измеряют телесные углы путем определения плоских углов и проведения дополнительных расчетов по формуле:

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

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

Производные единицы системы СИ образуются из основных и дополнительных единиц. В табл. 1.2 и 1.3 приведены производные единицы, наиболее употребляемые в радиотехнике.

Таблица 1.2. Производные единицы СИ

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

Т а б л и ц а 1.3. Единицы СИ, применяемые в практике радиоизмерений

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

Производные единицы бывают когерентными и некогерентными. *Когерентной* называется производная единица физической величины, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице. Например, скорость v равномерного прямолинейного движения связана с длиной пути l и временем t соотношением $v = l/t$. Остальные производные единицы — некогерентные.

Среди получивших широкое распространение внесистемных единиц следует отметить киловатт-час, ампер-час, градус Цельсия, и т. д.

Сокращенные обозначения различных единиц, как международных, так и русских, названных в честь великих ученых, пишутся с заглавных букв; например: ампер — А; ом — Ом; вольт — В; фарад — Ф (отметим, что часто используется не регламентированный термин — фарада). В тоже время для сравнения: метр — м, секунда — с, килограмм — кг.

Так как диапазон реальных значений большинства измеряемых физических величин очень велик, то применение целых единиц СИ иногда неудобно, поскольку в результате измерений получаются большие или малые их значения. Поэтому в системе СИ были установлены десятичные кратные и дольные единицы этой системы, которые образуются с помощью множителей.

Образованные таким образом кратные и дольные единицы физических величин пишутся слитно с наименованием основной или производной единиц СИ, например: километр (км), мегаватт (МВт), милливольт (мВ), мегагерц (МГц), наносекунда (нс), пикофарад (пФ).

Кратная единица физической величины — единица, бо́льшая в целое число раз системной, например килогерц (10^3 Гц), мегаватт (10^6 Вт).

Дольная единица физической величины определяется как единица, меньшая в целое число раз системной, например, микрогенри (10^{-6} Гн), пикофарад (10^{-12} Ф).

Таблица 1.4. Множители единиц

Множитель	Приставка	Обозначение приставок	
		международное	русское
10^{18}	экса	E	Э
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	милли	m	м
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а

Наименования кратных и дольных единиц системы СИ содержат ряд определенных приставок, соответствующих множителям, приведенным в табл. 1.4.

1.4. Основные метрологические термины и понятия

К общепринятым в метрологии определениям относятся понятия: *измерения, средства, принцип, метод и объект измерения, алгоритм измерения и шкалы измерений* и ряд других терминов.

Измерением называется процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Метрологическая суть измерения сводится к основному уравнению измерения (основному уравнению метрологии):

$$A = kA_0, \quad (1.2)$$

где A — значение измеряемой физической величины; A_0 — значение величины, принятой за образец; k — отношение измеряемой величины к образцу.

Любое измерение заключается в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу

сравнения, с так называемой *мерой* (см. далее). Такой подход выработан практикой измерений, исчисляемой сотнями лет. Еще великий математик Л. Эйлер утверждал: «Невозможно определить или измерить одну величину иначе как приняв в качестве известной другую величину этого же рода и указав соотношение, в котором они находятся».

Наиболее удобен вид основного уравнения метрологии (1.2), если выбранная за образец величина равна единице. При этом параметр k представляет собой числовое значение измеренной величины, зависящее от принятого метода измерения и единицы измерения.

Получаемая при измерениях физических величин информация называется *измерительной*. Зачастую информация об объекте измерения известна до проведения исследований, что является важнейшим фактором, обуславливающим эффективность измерения. Такую информацию об объекте измерения называют *априорной информацией*. При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а следовательно, нельзя выбрать нужные средства измерений. При наличии априорной информации об объекте в полном объеме, т. е. при известном значении измеряемой величины, измерения попросту не нужны. Априорная информация определяет достижимую точность измерений и их эффективность.

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

Основные характеристики измерений

Основными характеристиками измерений являются результат, погрешность, точность, правильность, сходимость, воспроизводимость и достоверность.

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

Часто в полученный результат вносят поправки (*поправка* — значение величины, одноименной с измеряемой, которая вводится в результат измерения для исключения определенных, так называемых *систематических* составляющих погрешности (см. гл.2), что находит отражение в терминологии:

- *неисправленный* результат измерения — значение физической величины, полученное при помощи средств измерений до внесения поправок;

• *исправленный* результат измерения — значение физической величины, полученное при помощи средств измерений и уточненное путем внесения в него необходимых поправок.

Погрешность средства измерения — разность между показаниями средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Точность измерений — понятие, отражающее меру близости результатов измерений к истинному значению измеряемой физической величины. Термин «точность измерений», т.е. степень приближения результатов измерения к некоторому действительному значению, не имеет строгого определения и используется для качественного сравнения измерительных операций. Точность и погрешность связаны обратной зависимостью. По точности измерения делят на три основные группы:

- *измерения максимальной возможной точности*, достижимой при существующем уровне развития науки и техники; это измерения, связанные с созданием и эксплуатацией эталонов, а также измерения, проводимые при научных исследованиях; для таких измерений необходима тщательная оценка погрешностей и анализ их источников;

- *контрольно-поверочные и лабораторные измерения*, к которым, в частности, относятся метрологическая аттестация средств измерений, лабораторный анализ, экспертные измерения; погрешность таких измерений не должна превышать некоторого определенного уровня;

- *технические измерения*, при которых погрешность оценивают по метрологическим характеристикам средств измерений с учетом применяемого метода измерений.

Правильность измерений — это метрологическая характеристика, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений.

Сходимость результатов измерений характеризует качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами и средствами измерений и в одних и тех же условиях.

Воспроизводимость результатов измерений — характеристика качества измерений физической величины, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенных к одним и тем же условиям.

Достоверность измерений определяется степенью *доверия* к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах, или в указанном интервале. Данный интервал в теории измерений называют *доверительным* и между его границами с заданной *доверительной вероятностью*

$$P_d(x_n < x_n < x_n) = 1 - q \quad (1.3)$$

находится истинное значение x_n оцениваемого параметра. В формуле (1.3) q — уровень значимости критерия ошибки (или, уровень значимости ошибки, см. гл. 2); x_n , x_n — нижняя и верхняя границы доверительного интервала.

Обычно измерения делят на *достоверные* и *недостоверные* в зависимости от того известны или неизвестны вероятностные характеристики их отклонения от истинных значений измеряемых величин.

Принцип измерений — совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, применение эффекта Холла для измерения мощности, эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения.

Метод измерений — совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Это достаточно общее определение на практике часто конкретизируют, относя его только к применяемым средствам измерения, например метод измерения частоты частотомером, напряжения — вольтметром, силы тока — амперметром и т. д.

Методика измерения — общий или поэтапный план проведения измерения — намеченный распорядок измерений, определяющий состав применяемых приборов, последовательность и правила проведения операций.

Объект измерения — это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

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

Алгоритм измерения — точное предписание о порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение физической величины.

Шкала измерений

На практике необходимо проводить измерения различных физических величин, характеризующих свойства веществ, объектов, тел, явлений и процессов. Некоторые свойства проявляются только количественно, другие — качественно. Количественные или качественные проявления любого свойства отражаются множествами, которые образуют *шкалы измерений*.

Шкала физической величины — упорядоченная последовательность значений физической величины, принятая по результатам точных измерений. *Отметки шкалы* — знак на шкале прибора (черточка, точка и т. д.), соответствующий некоторому значению физической величины. Для цифровых шкал числа являются отметками шкалы. Промежуток между соседними отметками шкалы называется *делением шкалы*. *Цена деления шкалы* — разность значений измеряемой величины, соответствующих соседним отметкам шкалы.

Отметки наносятся на шкалу при *градуировке* прибора, т. е. при подаче на его вход сигнала с выхода образцовой многозначной меры. *Указатель* —

часть отсчетного устройства, положение которого относительно отметок шкалы определяет показания измерительного прибора.

Среди шкал следует выделить три основных типа: шкалы наименований, интервалов и абсолютные шкалы.

1. *Шкала наименований (шкала классификации)* основана на приписывании объекту цифр (знаков), играющих роль простых имен. Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу: «не приписывая одну и ту же цифру разным объектам». Поэтому с цифрами, используемыми только как специфические имена, нельзя проводить никаких арифметических действий.

2. *Шкала интервалов (шкала разностей)* отражает разность значений физической величины. К таким шкалам относятся, например, температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта и Реомюра. На температурной шкале Цельсия за начало отсчета разности температур принята температура таяния льда. Для удобства пользования шкалой Цельсия интервал между температурами таяния льда и кипения воды разделен на 100 равных интервалов — градусов.

3. *Абсолютные шкалы* имеют естественное однозначное определение единицы измерения и не зависят от принятой системы единиц измерения. Данные шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, коэффициенту ослабления и т. д.

Понятия счета, испытания, контроля и поверки

Счет — процедура определения численности качественно однотипных объектов в данной их совокупности. Результатом счета является число объектов. Основные характеристики счета — достоверность и скорость.

Испытание — экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта как результата заданного воздействия на него при его функционировании и (или) при моделировании испытуемого образца и (или) воздействий.

Объектом испытаний является продукция или процессы ее производства и функционирования. В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектом может быть макет или модель изделия, как единичное изделие, так и их партия.

Под *условиями испытаний* понимают совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. Испытания классифицируют по ряду признаков. По *назначению* испытания делят на исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные. По *уровню проведения* различают: государственные, межведомственные и ведомственные. По *виду этапов разработки испытуемой продукции* различают предварительные и приемочные испытания. В зависимости от *вида испытаний готовой продукции* их подразделяют на квалификационные, приемосдаточные, периодические и типовые.

Целью испытаний считают нахождение истинного значения параметра, определенного не при тех реальных условиях, в которых он фактически может находиться в ходе испытаний, а в заданных номинальных условиях испытания. Реальные условия испытаний практически всегда отличаются от номинальных. Значит, результат испытания всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточного установления номинальных условий испытания.

Результатом испытаний называется оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям, данные анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний. Результат испытаний характеризуется *точностью* — свойством испытаний, описывающим близость их результатов к действительным значениям характеристик объекта в определенных условиях испытаний.

Контроль — процесс определения соответствия параметра изделия установленным требованиям или нормам. Контроль заключается в проведении двух этапов. На первом получают информацию о фактическом состоянии объекта, о признаках и показателях его свойств. Это *первичная* информация. На втором этапе первичную информацию сопоставляют с заранее установленными требованиями и нормами. При этом выявляют соответствие или несоответствие фактических данных требуемым. Информация об их расхождении называется *вторичной*.

Проверка — определение специальным органом метрологической службы метрологических характеристик средства измерения и установление его пригодности к применению на основании результатов контроля их соответствия предъявляемым требованиям. Основной метрологической характеристикой, определяемой при проверке средства измерений, является его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого средства измерений с более точным средством измерений — рабочим эталоном.

1.5. Классификация измерений

Измерения весьма разнообразны, что объясняется множеством измеряемых величин, различным характером их изменения во времени, различными требованиями к точности измерений и т. д. В связи с этим измерения классифицируют по различным признакам.

Виды измерений

Виды измерений определяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерения, необходимой скоростью измерения, условиями и режимом измерений и пр.

На рис. 1.2 представлена достаточно обобщенная классификация, из которой следует, что существует множество видов измерений, и число их может увеличи-



Рис. 1.2. Классификация видов измерений

ваться. Можно выделить виды измерений в зависимости от их цели: контрольные, диагностические и прогностические, лабораторные и технические, эталонные и поверочные, абсолютные и относительные и т. д. Ряд определений этой классификации приведем здесь, другие — в процессе изложения материала.

Наибольшее распространение получила классификация по общим приемам получения результатов измерений. Согласно этому признаку, измерения делятся на прямые, косвенные, совместные и совокупные.

Прямые измерения

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

$$A = x, \quad (1.4)$$

где x — значение величины, найденное путем ее измерения и называемое *результатом измерения*.

Косвенные измерения

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

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1.5)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_m$ — результаты прямых измерений величин, связанных функциональной зависимостью f с искомым значением измеряемой величины A .

Косвенные измерения характерны для практики радиоизмерений, например, измерение мощности методом амперметра-вольтметра, определение резонансной частоты колебательного контура по результатам прямых измерений емкости и индуктивности контура и т. д.

К косвенным относятся те измерения, при которых расчет осуществляют вручную или автоматически, но после получения результатов прямых измерений. При этом может быть учтена отдельно погрешность расчета значений.

По виду функциональной зависимости f косвенные измерения делят на линейные и нелинейные. Для *линейных косвенных измерений* математический аппарат статистической обработки полученных результатов разработан детально. *Нелинейные косвенные измерения* отличаются тем, что результаты измерений аргументов подвергаются функциональным преобразованиям.

Совокупные измерения

Совокупными называются проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых их значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых или косвенных измерениях различных сочетаний этих величин. При этом могут измеряться несколько комбинаций значений величин.

Например, измеряя сопротивления R_{ab} , R_{ac} и R_{bc} между вершинами треугольника, в котором соединены сопротивления R_1 , R_2 и R_3 (см. рис. 1.3) и, решая систему уравнений типа (1.5) можно определить искомые значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 методом совокупных измерений:

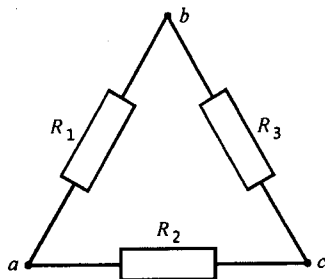


Рис. 1.3. К совокупным измерениям

$$R_{ab} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_{ac} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_{bc} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (1.6)$$

Совместные измерения

Совместными называют проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для установления зависимости между ними. Как видно из приведенных определений, совокупные и совместные измерения весьма близки друг к другу. В обоих случаях искомые значения находят в результате решения системы уравнений, коэффициенты в которых получены путем прямых измерений. Отличие состоит в том, что при совокупных измерениях одновременно определяют несколько однородных величин, а при совместных — разнородных.

Наиболее известный пример *совместных измерений* — определение зависимости сопротивления резистора от температуры:

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2], \quad (1.7)$$

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

Для определения величин R_{20} , α и β вначале измеряют сопротивление R_t резистора при, например, трех различных значениях температуры (t_1 , t_2 , t_3), а затем составляют систему из трех уравнений, по которой находят параметры R_{20} , α и β :

$$\begin{aligned} R_{t_1} &= R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2], \\ R_{t_2} &= R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2], \\ R_{t_3} &= R_{20}[1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2]. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Косвенные, совместные и совокупные измерения объединяются одним принципиально важным общим свойством: их результаты рассчитываются по известным функциональным зависимостям между измеряемыми величинами и величинами, определяемым путем прямых измерений. Различие между этими видами измерений заключается только в виде функциональной зависимости, используемой при расчетах. При косвенных измерениях она выражается одним уравнением в явном виде (1.6), при совместных и совокупных — системой неявных уравнений, например (1.8).

Абсолютные и относительные измерения. В зависимости от *выражения результатов измерений* последние делят на абсолютные и относительные.

Абсолютные измерения основаны на прямых измерениях одной или нескольких величин с использованием значений физических констант. Результат абсолютного измерения непосредственно выражается в единицах измеряемой величины.

Относительные измерения — измерения соотношения величины к однородной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к однородной величине, принимаемой за исходную. Относи-

тельные измерения при прочих равных условиях могут быть выполнены более точно, чем абсолютные, так как в суммарную погрешность не входит погрешность меры величины. Характерные примеры относительных измерений: измерение отношения напряжений или мощностей, исследование частотных характеристик (коэффициентов передачи) электрических цепей и т. д.

При относительных измерениях используют внесистемную безразмерную единицу — децибел (дБ), определяемую при сравнении напряжений U_2 и U_1 по формуле:

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

а при сравнении мощностей P_2 и P_1 :

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

Для перевода отношений мощностей и напряжений (токов) в децибелы и обратно применяют таблицы (табл. 1.5), приведенные в справочниках.

Т а б л и ц а 1.5. Децибелы и отношения

Децибел	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	Децибел	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
0,0	1,000	1,000	14,0	5,012	25,120
0,1	1,012	1,023	15,0	5,623	31,620
0,2	1,023	1,047	16,0	6,310	39,810
0,3	1,035	1,072	17,0	7,079	50,120
0,4	1,047	1,096	18,0	7,943	63,100
0,5	1,059	1,122	19,0	8,913	79,430
0,6	1,072	1,151	20,0	10,000	100,000
0,7	1,084	1,175	25,0	17,780	316,200
0,8	1,096	1,202	30,0	31,620	1000
0,9	1,109	1,230	35,0	56,230	3162,000
1,0	1,122	1,259	40,0	100,000	10^4
2,0	1,259	1,585	45,0	177,800	$3,162 \cdot 10^4$
3,0	1,413	1,995	50,0	316,200	10^5
4,0	1,585	2,512	55,0	562,300	$3,162 \cdot 10^5$
5,0	1,778	3,162	60,0	10^3	10^6
6,0	1,995	3,981	65,0	$1,778 \cdot 10^3$	$3,162 \cdot 10^6$
7,0	2,239	5,012	70,0	$3,162 \cdot 10^3$	10^7
8,0	2,512	6,310	80,0	10^4	10^8
9,0	2,818	7,943	90,0	$3,162 \cdot 10^4$	10^9
10,0	3,162	10,000	100	10^5	10^{10}
11,0	3,548	12,590	110	$3,162 \cdot 10^5$	10^{11}
12,0	3,981	15,850	120	10^6	10^{12}
13,0	4,467	19,950	150	$3,162 \cdot 10^7$	10^{15}

Основные методы измерений

Конкретные методы измерений определяются видом измеряемых величин, их размерами, требуемой точностью результата, быстротой процесса измерения, условиями, при которых проводятся измерения, и рядом других признаков. В принципе каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, которые могут отличаться друг от друга особенностями как технического, так и методического характера. В отношении технических особенностей можно сказать, что существует множество методов измерения, и по мере развития науки и техники, число их все увеличивается. С методической стороны все методы измерений поддаются систематизации и обобщению по общим характерным признакам.

Современные методы измерений принято делить на метод непосредственной оценки и метод сравнения (рис. 1.4).

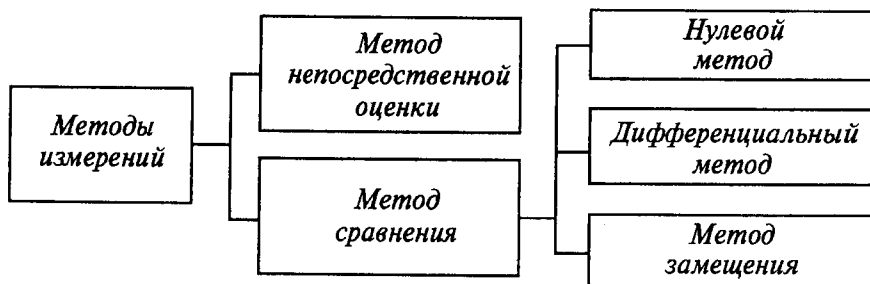


Рис. 1.4. Классификация методов измерения

При *методе непосредственной оценки* численное значение измеряемой величины определяют непосредственно по показанию измерительного прибора (например, измерение напряжения с помощью вольтметра). Быстрота процесса измерения методом непосредственной оценки делает его часто незаменимым для практического использования, хотя точность измерения обычно ограничена.

Метод сравнения — метод измерений, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Это может быть, например, измерение уровня напряжения постоянного тока путем сравнения с ЭДС нормального (эталонного) элемента. Приборы, реализующие измерение на основе метода сравнения, называют измерительными приборами сравнения. В отличие от приборов непосредственной оценки, более удобных для получения оперативной информации, приборы сравнения обеспечивают большую точность измерений. Метод сравнения применяют как для изме-

ния величин, содержащих запас энергии (напряжение, ток или мощность), так и для измерения параметров элементов электрических цепей: сопротивлений, индуктивностей и емкостей.

Различают следующие разновидности метода сравнения:

- *нулевой метод*, при котором действие измеряемой величины полностью уравнивается образцовой;
- *дифференциальный метод*, когда измеряется разница между измеряемой величиной и близкой ей по значению известной эталонной (например, измерение электрического сопротивления методом неуравновешенного моста); дифференциальный метод сравнения используют тогда, когда практическое значение имеет отклонение измеряемой величины от некоторого номинального значения (уход частоты, отклонение напряжения и т.д.);
- *метод замещения*, при котором действие измеряемой величины замещается (например, с помощью последовательно проводимых во времени действий) образцовой.

Из всех перечисленных методов нулевой метод обеспечивает наибольшую точность измерений физической величины. Его разновидностями являются:

- *компенсационный метод*, при котором действие измеряемой величины компенсируется (уравнивается) образцовой;
- *мостовой метод*, когда достигают нулевого значения тока в измерительной диагонали моста, в которую включается чувствительный индикаторный прибор (обычно нуль-индикатор).

По способу преобразования измеряемой величины и форме представления результата измерения делятся на аналоговые (непрерывные) и цифровые (дискретные).

При *аналоговых измерениях* измерительный прибор производит непрерывное преобразование измеряемой величины, результатом которого является перемещение указателя относительно шкалы. Заключение о численном значении величины делает оператор, отмечая положение указателя относительно отметок шкалы измерительного прибора. Точность такого измерения ограничивается геометрическими особенностями указателя и шкалы и часто не превышает 0,05 %.

При *цифровых измерениях* сравнение физической величины с рядом образцовых значений производится в измерительном приборе автоматически, оператор же получает численное значение измеренной величины в цифровой форме. Естественно, что здесь все зависит от точности сравнения в измерительном приборе и, к тому же, исключаются субъективные ошибки оператора. Современные цифровые приборы, как правило, обеспечивают более высокую точность, чем аналоговые. Роль оператора упрощается, так как он лишь считывает число.

По характеру изменения измеряемой величины во времени различают статический и динамический режимы измерений.

Статический режим измерений — это режим измерений, при котором средство измерений работает в статическом режиме, т.е. когда выходной сигнал остается неизменным в течение времени его использования (или меняется так медленно, что каждый результат измерения может быть выражен только одним числом).

Динамический режим измерений — это режим измерений, результатом которого является функциональная зависимость измеряемой величины от времени, т.е. когда выходной сигнал средства изменяется во времени, в соответствии с изменением по времени измеряемой величины. Таким образом, динамические измерения применяют для измерения параметров величин, имеющих зависимость от времени. Пример динамического измерения — определение мгновенных значений радиотехнических сигналов в течение какого-либо интервала времени. Динамические измерения могут быть непрерывными (применяемые технические средства позволяют, непрерывно следить за значениями измеряемой величины) и дискретными (значения измеряемой величины фиксируются только в отдельные моменты времени). Для оценки точности результатов динамических измерений необходимо знание динамических свойств средств измерений.

Необходимо также различать измерения параметров *детерминированных величин* (сигналов) и *характеристик случайных величин* (сигналов, процессов). В первом случае измеряются заведомо постоянные, либо меняющиеся по известному закону величины. Во втором — в результате некоторого числа опытов определяются характеристики законов распределения измеряемых случайных величин (амплитуды, длительности импульсов и т.д.).

В зависимости от метода измерения и свойств применяемых средств измерений, все рассмотренные выше виды измерений могут выполняться либо с *однократными*, либо с *многократными* наблюдениями.

Наблюдением при измерении (измерительным наблюдением) называется единичная экспериментальная операция, итог которой — *результат наблюдения* — всегда имеет случайный характер и представляет собой одно из значений измеряемой величины, подлежащей совместной обработке для получения результата измерения. От числа наблюдений измеряемой величины зависит способ обработки экспериментальных данных и оценки погрешностей измерений.

На практике многократные наблюдения при прямых измерениях какой-то физической величины осуществляются одним экспериментатором, в одинаковых условиях и с помощью одного и того же средства измерения. Такие измерения принято называть *равноточными*. При равноточных измерениях средние квадратические отклонения (СКО) результатов всего ряда измерений могут быть близки и даже равны между собой.

Однако часто необходимо определить наиболее точную оценку измеряемой величины на основании результатов наблюдений, полученных разными

экспериментаторами, в разных условиях, с применением разных методов и средств измерения. Результаты таких наблюдений будут иметь различную точность, и поэтому такие измерения называют *неравноточными*.

По необходимой точности оценки погрешности измерения делятся на следующие виды: высшей точности (*прецизионные*), связанные с созданием эталонов и измерением фундаментальных физических констант; технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений, регламентированными условиями измерений, и оценивается до проведения измерений; контрольно-поверочные, погрешность которых не должна превышать некоторых заранее заданных значений.

1.6. Средства измерений

Основным документом законодательной метрологии, определяющим метрологические требования к средствам измерений, является Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений». Современное понятие «средство измерений» введено с 1 января 2001 г. Рекомендацией по межгосударственной стандартизации ПМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения».

Средство измерений (СИ) — это техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. Данное определение раскрывает метрологическую сущность средств измерения, заключающуюся в умении хранить (или воспроизводить) единицу физической величины и в поддержании неизменности размера хранимой единицы во времени. Первое позволяет выполнить собственно измерение, суть которого, как известно, состоит в сравнении измеряемой величины с ее установленной единицей. Второе принципиально необходимо, поскольку при изменении размера хранимой единицы физической величины с помощью данного средства измерения нельзя получить результат измерения с требуемой точностью.

Итак, измерять с приемлемой для практики точностью можно только при условии, что средство измерений обеспечивает хранение (или воспроизведение) единицы измеряемой величины практически неизменной как во времени, так и под воздействием факторов окружающей среды. Причем эту неизменность размера единицы во времени и подверженность ее изменениям под воздействием влияющих факторов необходимо контролировать. В зависимости от требований к качеству измерений этот контроль происходит с помощью различных по метрологическим функциям средств измерений.

Показания средства измерений либо непосредственно воспринимаются органами чувств человека (например, показания стрелочного или цифрового

приборов), либо, если они недоступны восприятию человеком, используются для преобразования другими средствами измерений.

Классификация средств измерений

Множество измеряемых величин, а также широкий диапазон их возможных значений приводят к многообразию принципов, на которых базируется построение радиоэлектронной измерительной аппаратуры. Например, методы измерений и конструкции приборов, осуществляющих измерения в различных частотных диапазонах, могут принципиально отличаться друг от друга. В диапазоне низких частот геометрические размеры прибора много меньше длины волны колебаний, что позволяет строить измерительную аппаратуру на элементах с сосредоточенными параметрами. На сверхвысоких частотах размеры измерительных элементов средств измерений сравнимы с длиной волны электромагнитных колебаний, а результаты измерения зависят от места подключения прибора, его конструкции и размеров.

Используемые в различных областях науки и техники средства измерений, чрезвычайно многообразны. Однако для этого множества можно выделить некоторые общие признаки, присущие всем средствам измерений независимо от области применения.

По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, средства измерений делятся на:

- *метрологические*, предназначенные для метрологических целей — воспроизведения единицы и (или) ее хранения или передачи размера единицы рабочим средствам измерений;
- *рабочие*, применяемые для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Метрологические средства измерений весьма немногочисленны. Они разрабатываются, производятся и эксплуатируются в специализированных научно-исследовательских центрах. Поэтому подавляющее большинство используемых на практике средств измерений принадлежат ко второй группе.

По уровню автоматизации все средства измерений делятся на три основные группы:

- *неавтоматические*;
- *автоматизированные*, производящие в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции;
- *автоматические*, производящие в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей данных или выработкой управляющих сигналов.

По уровню стандартизации средства измерений делятся на:

- *стандартизованные*, изготовленные в соответствии с требованиями соответствующего государственного или отраслевого стандарта;
- *нестандартизованные* (уникальные), применяемые для решения спе-

цифических измерительных задачи в специальных направлениях науки и техники, в стандартизации требований к которым нет необходимости.

Подавляющее большинство средств измерений является стандартизованным. Они выпускаются серийно и обязательно подвергаются государственным испытаниям. Нестандартизованные средства измерений разрабатывают специализированные научно-исследовательские организации и выпускают единичными экземплярами. Они не проходят государственных испытаний, их характеристики определяют при метрологической аттестации.

По отношению к измеряемой физической величине средства измерений подразделяются на:

- *основные* — это средства измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей;
- *вспомогательные* — это средства измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерения необходимо учесть для получения результатов измерения требуемой точности.

Классификация по назначению, роли в процессе измерения и выполняемым функциям является основной и представлена на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Классификация средств измерений

По реализации процедуры измерения средства измерений бывают *элементарными* и *комплексными*.

Средства измерений разделяют на меры, устройства сравнения (компараторы), измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы (ИС). Измерительные системы условно делят на информационно-измерительные (ИИС), измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) и компьютерно-измерительные (КИС).

Элементарные средства измерений

Элементарные средства измерений предназначены для реализации отдельных операций прямого измерения.

К ним относятся меры, устройства сравнения и измерительные преобразователи. Каждое из них, взятое по отдельности, не может осуществить операцию измерения.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера (значения). В качестве меры в радиоизмерениях, в частности, используются: кварцевый автогенератор (точнее частота колебаний кварцевого генератора) — мера частоты электрических колебаний; измерительный резистор — мера электрического сопротивления; измерительный конденсатор — мера электрической емкости. Меры бывают однозначными и многозначными.

Однозначная мера воспроизводит физическую величину одного размера. Например, измерительный резистор, измерительный конденсатор постоянной емкости, ЭДС нормального элемента.

Многозначная мера воспроизводит ряд одноименных величин различного размера, например, потенциометр, вариометр индуктивностей, конденсатор переменной емкости.

Кроме этого, различают *наборы мер, магазины мер, установочные и встроенные меры*. Набор мер — специально подобранный комплект однотипных элементов, применяемых не только по отдельности, но и в различных сочетаниях для воспроизведения ряда одноименных величин различного размера, например, набор измерительных резисторов, или конденсаторов.

Устройство сравнения (компаратор) — это средство измерений, позволяющее сравнивать друг с другом меры однородных величин или показания измерительных приборов. Примером может служить фотореле, включающее (выключающее) уличное электрическое освещение. Во многих относительно простых средствах измерений роль компаратора выполняют органы чувств человека, главным образом зрение, например при сравнении отклонения указателя прибора и числа делений, нанесенных на его шкале.

Степень совершенства компаратора определяется минимально возможным порогом чувствительности, а также его быстродействием — временем переключения из одного состояния в другое. У идеального компаратора по-

рог и время переключения равны нулю. В реальных схемах компаратора вводят порог срабатывания (для исключения так называемого «дребезга контактов»), что приводит к возникновению аддитивной (суммируемой с измеряемой величиной) погрешности.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительные преобразователи могут как входить в состав измерительных приборов, так и применяться самостоятельно. Измерительные преобразователи, которые ГОСТ по сложившейся традиции рассматривает, как самостоятельный класс средств измерений, не могут по своей сути являться хранителем единицы измерения. Зачастую конструктивно обособленные первичные преобразователи называют *датчиками*.

Работа измерительного преобразователя протекает в условиях, когда помимо основного сигнала X , связанного с измеряемой величиной, на него воздействует множество других сигналов Z , являющихся в данном случае помехами. Выходным сигналом измерительного преобразователя служит некая величина Y (напряжение, ток).

Важнейшей характеристикой измерительного преобразователя является функция (уравнение) преобразования, которая описывает статические свойства преобразователя и в общем случае записывается в виде $Y = F(X, Z)$. Необходимо отметить, что преобразования измеряемых величин всегда таят в себе опасность внесения погрешностей в результат измерений.

Измерительные преобразователи классифицируют по ряду специфических признаков.

По местоположению в измерительной цепи преобразователи делятся на первичные и промежуточные.

Первичный преобразователь — измерительный преобразователь, к которому подведена измеряемая величина, т.е. является первым в измерительной цепи. Например: термопара в цепи термоэлектрического термометра.

Промежуточный преобразователь располагается в измерительной цепи после первичного.

Важной разновидностью преобразователей является *масштабный преобразователь* — измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера величины или измерительного сигнала в заданное число раз. Например: измерительный трансформатор тока, делитель напряжения, измерительный усилитель.

По виду входных и выходных величин измерительные преобразователи делятся на:

- *аналоговые*, преобразующие одну аналоговую величину в другую аналоговую величину;

- *аналого-цифровые* (АЦП), предназначенные для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код;
- *цифроаналоговые* (ЦАП), предназначенные для преобразования цифрового кода в аналоговую величину.

Еще одним типом преобразователей является *передающий преобразователь* — измерительный преобразователь, служащий для дистанционной передачи сигнала измерительной информации к другим устройствам или системам.

Комплексные средства измерений

Комплексные средства измерений предназначены для реализации всей процедуры измерения. К ним относятся измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы.

Измерительным прибором называется средство измерения, предназначенное для выработки определенного вида сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия оператором.

В электронной технике, радиотехнических цепях, устройствах и системах, а также системах связи сигналом измерительной информации является, как правило, электрический сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной. *Информативным параметром входного электрического сигнала* средства измерения служит параметр входного сигнала, функционально связанный с измеряемой физической величиной и используемый для передачи ее значения или являющийся самой измеряемой величиной.

Категория средств измерений, охватывающая измерительные приборы и преобразователи, называется *измерительными устройствами*.

Измерительные приборы принято классифицировать по ряду специфических признаков.

По форме индикации измеряемой величины все радиоизмерительные приборы делят на показывающие и регистрирующие, среди которых различают самопишущие и печатающие.

Показывающий измерительный прибор — устройство, предназначенное только для считывания показаний, например вольтметр.

Регистрирующий измерительный прибор — прибор, в котором предусмотрена регистрация показаний измеряемой величины, например универсальный осциллограф.

Самопишущий измерительный прибор — регистрирующий прибор, в котором предусмотрена запись показаний в форме диаграммы.

Печатающий измерительный прибор — регистрирующий измерительный прибор, в котором предусмотрена печать показаний, как правило, в цифровой форме.

По методу преобразования измеряемой величины различают приборы прямого, компенсационного (уравновешивающего) и смешанного преобразования.

По назначению измерительные приборы делятся на амперметры, вольтметры, омметры, частотомеры и т. д.

Измерительные приборы, используемые в радиотехнике, по *структурной* схеме можно в самом общем виде разделить на *электромеханические* и *электронные*. К радиоизмерительным приборам относятся только электронные, в состав которых в качестве отсчетного узла могут еще входить электромеханические устройства.

По форме преобразования используемых измерительных сигналов приборы разделяются на аналоговые и цифровые.

Аналоговый измерительный прибор — средство измерения, показания которого являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины. Аналоговые приборы делят на четыре основные группы, предназначенные для различных измерительных целей.

В первую входят приборы для измерения параметров и характеристик сигналов (например, осциллографы, вольтметры, частотомеры, анализаторы спектра и т. д.).

Вторую группу образуют приборы для измерения параметров и характеристик активных и пассивных элементов электрических схем. Это — измерители сопротивления, емкости, индуктивности, параметров микросхем, транзисторов, а также приборы для снятия частотных и переходных характеристик.

Третья группа — измерительные генераторы, являющиеся источниками сигналов различной амплитуды, формы и частоты.

В четвертую группу входят элементы измерительных схем, такие, как преобразователи, аттенюаторы, циркуляторы, фазовращатели, направленные ответвители и т. д.

Цифровым измерительным прибором (ЦИП) называется средство измерения, автоматически вырабатывающее дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

ЦИП имеют перед аналоговыми ряд преимуществ:

- удобство и объективность отсчета измеряемых величин;
- высокую точность результатов измерения;
- широкий динамический диапазон при высокой разрешающей способности;
- высокое быстродействие из-за отсутствия подвижных электромеханических элементов;
- возможность автоматизации процесса измерения;
- возможность использования новейших достижений микроэлектроники;
- высокую устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям.

По принципу действия измерительные приборы делят на ряд классов, перечисленных ниже.

Измерительные приборы прямого действия, в которых предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, т.е. без применения цепей обратной связи; например, амперметры, вольтметры.

Измерительные приборы сравнения, предназначенные для непосредственного сравнения измеряемой величины с известной величиной; например, электроизмерительный потенциометр.

Интегрирующие измерительные приборы, в которых подводимая величина интегрируется по времени или по другой независимой переменной; например, электрический счетчик энергии.

Суммирующие измерительные приборы, показания которых функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к ним по разным каналам; например, ваттметр для измерения суммы мощностей нескольких электрических генераторов.

Сложные измерительные средства могут состоять из функционально связанных простых измерительных средств. К ним относятся измерительные установки и измерительные системы.

В Российской Федерации согласно соответствующему стандарту все радиотехнические измерительные приборы и соответствующие им меры электрических величин по характеру измерений и виду измеряемых величин разделены на подгруппы, обозначаемые прописными буквами русского алфавита. При этом приборы делятся на 20 подгрупп:

А — измерители силы тока; Б — источники питания для схем измерений и измерительных приборов; В — измерители напряжения; Г — генераторы измерительные; Д — измерители ослабления и аттенюаторы; Е — измерители параметров элементов с сосредоточенными постоянными; И — приборы для импульсных измерений; К — комплексные измерительные установки; Л — измерители параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов; М — измерители мощности; П — измерители напряженности поля и радиопомех; Р — измерители параметров элементов и трактов с распределенными постоянными; С — приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигналов и их спектров; У — усилители измерительные; Ф — измерители фазовых сдвигов и группового времени запаздывания; Х — приборы для наблюдения и исследования характеристик электрических цепей и радиоустройств; Ч — измерители частоты; Ш — измерители электрических и магнитных свойств материалов; Э — измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов; Я — блоки радиоизмерительных приборов.

Входящие в подгруппу измерительные приборы подразделяются на виды в соответствии с основной выполняемой функцией. Видам присваивается буквенно-цифровое обозначение, состоящее из буквы подгруппы и номера

вида. Так, например, вид «Вольтметры переменного тока» обозначается как ВЗ, вид «Вольтметры импульсного тока» — В4 и т. д. Полное наименование прибора определяется наименованием вида, к которому прибор относится.

В соответствии с совокупностью технических характеристик и очередностью разработок приборы всех видов разделяются на типы, которым соответствует порядковый номер модели. Обозначение прибора состоит из обозначения вида и номера модели, причем перед последним ставится дефис. В частности, надпись на измерительном приборе ВЗ-40 говорит о том, что это сороковая модель вольтметров переменного тока.

Более широкой является классификация средств измерений по конкретным признакам. Одним из основных признаков служит диапазон рабочих частот, в котором данное средство измерений работает или сохраняет нормированные метрологические характеристики. Выбирая средство измерений для эксплуатации в некотором частотном диапазоне, необходимо учитывать, что до настоящего времени в России имеется разночтение наименований диапазонов частот.

Решением Международного консультативного комитета по радио (МККР) рекомендована определенная система деления и наименований полос в спектре частот, применяемом для радиосвязи, радиовещания и телевидения. Согласно этой рекомендации установлены следующие диапазоны:

крайне низких частот (КНЧ) — 3...30 Гц;
сверхнизких частот (СНЧ) — 30...300 Гц;
инфранизких частот (ИНЧ) — 300...3000 Гц;
очень низких частот (ОНЧ) — 3...30 кГц;
низких частот (НЧ) — 30...300 кГц;
средних частот (СЧ) — 300...3000 кГц;
высоких частот (ВЧ) — 3...30 МГц;
очень высоких частот (ОВЧ) — 30...300 МГц;
ультравысоких частот (УВЧ) — 300...3000 МГц;
сверхвысоких частот (СВЧ) — 3...30 ГГц;
крайне высоких частот (КВЧ) — 30...300 ГГц;
гипервысоких частот (ГВЧ) — 300...3000 ГГц.

В ряде официальных российских документов на средства измерений и некоторой литературе по радиоизмерениям еще остается традиционное деление на диапазоны частот: инфранизких (ИНЧ) — до 20 Гц; низких (НЧ) — от 20 Гц до 300 кГц; высоких (ВЧ) — от 30 кГц до 300 МГц; сверхвысоких (СВЧ) — свыше 300 МГц.

Измерительные приборы, применяемые в радиотехнике, характеризуются следующими основными показателями.

Диапазон измерений — область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности измерительного прибора (средства измерения).

Диапазон показаний — размеченная область шкалы, ограниченная ее начальным и конечным значениями, т.е. указанными на ней наименьшим $X_{\min}$ и наибольшим $X_{\max}$ возможными значениями измеряемой величины (он может быть шире диапазона измерений).

Предел измерений — наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений.

Область рабочих частот (диапазон частот) — полоса частот, в пределах которой погрешность прибора, полученная при изменении частоты сигнала, не превышает допускаемого предела.

Градуировочная характеристика — это зависимость, определяющая соотношение между сигналами на выходе и входе средства измерений в статическом режиме.

Чувствительность по измеряемому параметру — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему его изменению измеряемой величины:

$$S = \lim \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx}, \quad (1.9)$$

где x — измеряемая величина; y — сигнал на выходе; Δx — изменение измеряемой величины; Δy — изменение сигнала на выходе.

Предельная чувствительность (по напряжению, току или мощности) — минимальная величина исследуемого сигнала (напряжения, тока или мощности), подаваемого на вход прибора, которая необходима для получения отсчета с погрешностью, не превосходящей допустимой.

Разрешающая способность (абсолютная) — минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, которая может быть различима с помощью прибора.

Быстродействие (скорость измерения) — максимальное число измерений в единицу времени, выполняемых с нормированной погрешностью.

Время измерения — время, которое требуется для определения значения измеряемой величины с заданной погрешностью.

Входное сопротивление (полное) $Z_{\text{вх}}$ — сопротивление измерительного прибора со стороны его входных зажимов. На сравнительно низких частотах входную цепь прибора, включаемого параллельно измеряемой цепи, можно представить эквивалентной схемой, состоящей из соединенных параллельно резистора $R_{\text{вх}}$ и конденсатора $C_{\text{вх}}$.

Чтобы не влиять на измеряемую цепь, измерительные приборы должны иметь как можно большее активное входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ и возможно меньшую входную емкость $C_{\text{вх}}$. Поэтому в области низких частот $\omega = 2\pi f$, когда емкостное сопротивление велико по сравнению с активным сопротивлением $1/(\omega C_{\text{вх}}) \gg R_{\text{вх}}$, практически входное сопротивление измерительного

прибора $Z_{вх} = R_{вх}$. В области высоких частот входное сопротивление прибора определяется преимущественно емкостью и $Z_{вх} = 1/(j\omega C_{вх})$, так как в этом случае $1/(\omega C_{вх}) \ll R_{вх}$.

Выходное сопротивление $Z_{вых}$ — сопротивление измерительного прибора со стороны его выходных зажимов. Это сопротивление определяет допустимую нагрузку прибора при подключении его, например, к компьютеру.

Порог чувствительности — изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение показаний, обнаруживаемое наблюдателем при нормальном для данного прибора способе отсчета.

Показание — значение измеряемой величины, определяемое по отсчетному устройству прибора и выраженное в единицах этой величины.

Вариация показаний — разность между показаниями прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к ней со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

Собственная потребляемая мощность $P_{соб}$ — мощность, потребляемая от измеряемой цепи (чем $P_{соб}$ меньше, тем точнее измерения).

Погрешности измерительного прибора — инструментальные погрешности.

Все перечисленные показатели относятся к метрологическим характеристикам радиотехнических средств измерений. Эти характеристики чаще всего нормируются в технической документации. Есть и другие характеристики измерительных приборов, присущие только цифровым средствам измерения, которые будут введены позднее.

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

Измерительную установку, используемую для испытания каких-либо изделий, называют *испытательным стендом*.

Измерительную установку с включенными в нее образцовыми средствами измерений (в частности, эталонами), предназначенную для проверки средств измерений, называют *поверочной установкой* (например, установка для проверки вольтметров). Некоторые большие измерительные установки, используемые в основном для проверки радиотехнических комплексов типа радиолокационных станций (РЛС), называют *измерительными машинами*.

Измерительная система — совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в удобной для автоматической обработки форме, ее передачи и использования в различных системах управления. Как уже отмечалось, ИС достаточно условно разделяются на информационно-измерительные системы, измерительно-вычислительные комплексы и компьютерно-измерительные системы.

Информационно-измерительные системы — это совокупность функционально объединенных средств измерений, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

Измерительно-вычислительные комплексы представляют собой совокупность средств измерений и компьютеров, объединенных с помощью устройств сопряжения и предназначенных для измерений, научных исследований и расчетов.

Компьютерно-измерительная система (виртуальный прибор) состоит из стандартного или специализированного компьютера со встроенной в него платой (модулем) сбора данных.

1.7. Эталоны единиц электрических величин

Средства измерений, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц измерений, поверки и градуировки приборов делятся на эталоны и образцовые средства измерения.

Эталон — средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы физической величины с наивысшей точностью для данного уровня развития измерительной техники с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений. Классификация, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливаются соответствующими стандартами.

Перечень эталонов не повторяет перечня физических величин. Для ряда единиц эталоны не создаются из-за того, что нет возможности непосредственно сравнивать соответствующие физические величины, например, нет эталона площади. Не создаются эталоны и в том случае, когда единица физической величины воспроизводится с достаточной точностью на основе сравнительно простых средств измерений других физических величин.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются физической величиной, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

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

му измерению. Реализация этих требований привела к созданию «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

Воспроизводимость — возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники.

Сличаемость — возможность сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерения.

Эталоны классифицируют в зависимости от метрологического назначения. Это назначение предполагает оснащение метрологической службы первичными, специальными, государственными, национальными, международными и вторичными эталонами (рис. 1.6).

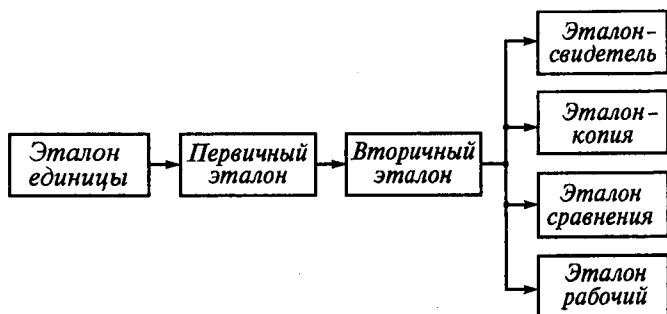


Рис. 1.6. Классификация эталонов

Первичный эталон — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью. Первичные эталоны — это уникальные средства измерений, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы. Они составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений.

Первичный эталон может быть специальным, государственным, национальным и международным.

Специальный эталон — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий для этих условий первичный эталон. Он служит для воспроизведения единицы в условиях, когда первичный эталон нельзя использовать, и прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью технически неосуществима (например, на высоких и сверхвысоких частотах, в начале и конце участков диапазонов измерений и т. д.).

Первичные и специальные эталоны являются исходными для страны, их утверждают в качестве *государственных*.

Государственный — это первичный (или специальный) эталон, признанный решением уполномоченного Государственного органа в качестве исходного на территории государства. Государственные эталоны создают, хранят и применяют центральные метрологические научные институты страны, а утверждает Госстандарт. Точность воспроизведения единицы должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники. В состав государственных эталонов включают средства измерений, с помощью которых воспроизводят и (или) хранят единицу физической величины, контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы физической величины, осуществляют его передачу.

Погрешности государственных первичных и специальных эталонов характеризуются *неисключенной систематической погрешностью* (НСП), *случайной погрешностью* и *нестабильностью*. Неисключенная систематическая погрешность описывается границами, в которых она находится; случайная погрешность определяется средним квадратическим отклонением результата измерений при воспроизведении единицы с указанием числа независимых измерений (понятия «неисключенная систематическая погрешность» и «среднее квадратическое отклонение» будут введены в гл. 2). Нестабильность эталона задается изменением размера единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, за определенный промежуток времени.

Национальный — эталон, признанный официальным решением в качестве исходного для страны.

Международный — эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

Вторичный эталон — эталон, значение которого устанавливают по первичному эталону. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. По метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на эталоны-свидетели, эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны.

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

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

Эталон сравнения применяется для взаимного сличения эталонов, которые по тем или иным причинам нельзя непосредственно сравнивать друг с другом (например, международные сличения эталонов).

Рабочие эталоны предназначены для поверки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений. Рабочие эталоны применяются во многих территориальных метрологических центрах.

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

Передача размеров единиц физических величин от эталонов рабочим мерам и измерительным приборам осуществляется с помощью рабочих эталонов (до недавнего времени в Российской Федерации вместо термина «рабочие эталоны» использовалось понятие «образцовые средства измерений», которое в других странах не применяют).

Рабочие эталоны при необходимости подразделяются на 1-й, 2-й и т. д. разряды, определяющие порядок их соподчинения в соответствии с поверочной схемой. Различным видам измерений устанавливают, исходя из требований практики, различное число разрядов рабочих эталонов, определяемых стандартами на поверочные схемы для данного вида измерений.

На схеме рис. 1.7 показана метрологическая последовательность передачи размеров единиц физических величин от первичного эталона рабочим, от рабочих эталонов — рабочим мерам и измерительным приборам (рабочим средствам измерений).

Совокупность всех перечисленных эталонов образует эталонную базу Российской Федерации.

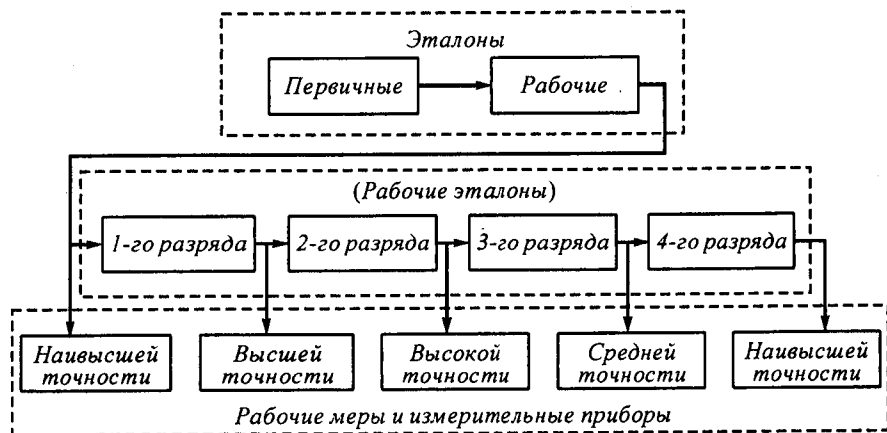


Рис. 1.7. Структура передачи размеров единиц физических величин

Эталоны основных электрических величин

Основной единицей электрических величин является единица силы тока — ампер (А).

Производные от ампера единицы электрических величин:

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

Все перечисленные единицы воспроизводятся и хранятся посредством Государственных первичных эталонов.

Эталон единицы силы электрического тока. Еще недавно *государственным первичным эталоном ампера* был комплекс средств измерений, куда входили токовые весы и мера электрического сопротивления, применяемая при передаче размера ампера (эталон сравнения). В токовых весах, представляющих собой рычажные равноплечие весы, с одной стороны на коромысло действует сила взаимодействия двух соленоидов (катушка индуктивности), один из которых подвижен и подвешен к этому коромыслу, с другой стороны — гирия известной массы. При протекании по катушкам постоянного тока возникает сила их индуктивного взаимодействия, которая уравнивается силой тяжести.

Итак, при равновесии весов сила тока определяется массой гири, ускорением ее свободного падения в месте расположения весов, постоянной электродинамической системы, которая зависит от формы и размеров соленоидов, диаметра сечения их провода, значения относительной магнитной проницаемости среды и прочее, т.е. ампер воспроизводится через основные единицы — метр, секунду, килограмм.

В связи с введением в метрологическую практику эталона вольты на основе эффекта Джозефсона и эталона ома на основе эффекта Холла назначение ампер-весов утратило смысл. Был разработан новый эталон ампера, который состоит из двух комплексов. В первом ампер установлен через вольт и ом с применением квантовых эффектов Джозефсона и Холла, а в другом — через фарад, вольт и секунду с использованием методов электрометрии. Современный *государственный первичный эталон ампера* состоит из аппаратуры, выполненной на основе:

- квантовых эффектов Джозефсона и Холла, включая меру напряжения, меру электрического сопротивления, сверхпроводящий компаратор тока и регулируемые источники тока;
- использования методов электрометрии, включая входной блок с набором мер постоянной емкости, интегратор, измерительный блок с частотомером, цифровым вольтметром и компаратором.

Государственный первичный эталон ампера воспроизводит значение силы постоянного электрического тока и обеспечивает передачу размера ампера в диапазоне $10^{-16} \dots 30$ А. Эталон воспроизводит единицу силы тока со средним квадратическим отклонением результата измерений не более $5 \cdot 10^{-8}$ А при номинальных значениях силы тока $10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ А. Неисключенная систематическая погрешность не должна превышать $2 \cdot 10^{-8}$ А при номинальных значениях силы постоянного тока 10^{-3} и 1 А.

Для воспроизведения и хранения единицы силы переменного тока разработаны два государственных специальных эталона.

Государственный эталон силы переменного тока для диапазона частот $40 \dots 10^5$ Гц и значений токов $0,01 \dots 10$ А воспроизводит ампер со средним квадратическим отклонением не более 10^{-4} А при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-4}$ А.

Государственный эталон силы переменного тока для диапазона частот $0,1 \dots 300$ МГц и значений токов $3 \dots 100$ А воспроизводит ампер со средним квадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-4}$ А при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $8,5 \cdot 10^{-4}$ А.

Эталон единицы электродвижущей силы и напряжения. *Государственный первичный эталон вольта* обеспечивает воспроизведение единицы ЭДС и электрического напряжения со средним квадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-8}$ В, при неисключенной систематической погрешности, не превышающей 10^{-6} В.

Для воспроизведения и хранения единицы напряжения переменного тока разработаны и используются два государственных специальных эталона.

Государственный первичный эталон напряжения переменного тока для значений $0,1 \dots 10$ В в диапазоне частот $20 \dots 3 \cdot 10^7$ Гц воспроизводит единицу напряжения со средним квадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-5}$ В при неисключенной систематической погрешности, не превышающей значения в $3 \cdot 10^{-4}$ В.

Государственный первичный эталон напряжения переменного тока для значений $0,1 \dots 1$ В в диапазоне частот $30 \dots 3000$ МГц воспроизводит вольт со средним квадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-3}$ В при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-2}$ В.

Эталон единиц времени и частоты. Единица времени — секунда (с) входит в число основных единиц СИ, а единица частоты — герц (Гц) — в число производных единиц. Если обозначить частоту гармонических колебаний f , а их период T , то $f = 1/T$ (1/с).

Государственный первичный эталон времени обеспечивает воспроизведение значений интервалов времени $10^{-9} \dots 10^8$ с в диапазоне частот $1 \dots 10^{14}$ Гц со средним квадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-14}$ с при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-13}$ с.

Эталон единицы электрического сопротивления. *Государственный первичный эталон* *ома* обеспечивает воспроизведение единицы электрического сопротивления со средним квадратическим отклонением не более 10^{-7} Ом при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-7}$ Ом.

Эталон единицы электрической емкости. *Государственный первичный эталон электрической емкости* воспроизводит фарад со средним квадратическим отклонением не более $2 \cdot 10^{-7}$ Ф при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-7}$ Ф. В диапазоне частот 1...100 МГц эталон воспроизводится со средним квадратическим отклонением не более $3 \cdot 10^{-5}$ Ф при неисключенной систематической погрешности, не превышающей 10^{-4} Ф.

Эталон единицы индуктивности. *Государственный первичный эталон единицы индуктивности* осуществляет передачу генри на частоте 1 кГц со средним квадратическим отклонением не более 10^{-6} Гн при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Перспективы создания и развития эталонов

Все возрастающие требования к точности измерений в различных областях науки и техники стимулируют создание новых специальных эталонов и увеличение точности уже существующих. Как правило, при разработке эталонов стремятся использовать стабильные физические явления и процессы, воспроизведение которых обеспечивается фундаментальными законами физики и мало зависит от конкретных особенностей построения эталонов. Наиболее ярким примером такого подхода является утвержденный в 1983 г. Государственный первичный эталон времени и частоты, использующий явление резонансного поглощения электромагнитной волны атомами цезия.

Эталоны различных физических величин стремятся создавать так, чтобы они образовывали определенную взаимосвязанную систему. Такие связи устанавливаются за счет использования первичных эталонов основных физических величин. Например, специальные эталоны мощности электромагнитных СВЧ-колебаний и мощности колебаний оптического диапазона связаны между собой так, как их аттестуют по напряжению и сопротивлению на постоянном токе. Эталоны одной и той же физической величины для разных диапазонов частот сличают на перекрывающихся границах рабочих диапазонов.

Стандартные образцы

В ряде практических измерений перспективным средством повышения эффективности поверочных работ является применение стандартных образцов. Правила работы со стандартными образцами устанавливают соответствующий ГОСТ Российской Федерации и рекомендации. Согласно этим документам, *стандартный образец состава и свойств веществ и материалов* — это средство измерений в виде вещества (материала), состав или свойства которого установлены аттестацией.

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

метрологической аттестации методик выполнения измерений;
градуировки, метрологической аттестации и поверки средств измерения;
контроля показателей точности измерений;

измерения физических величин, характеризующих состав или свойства веществ и материалов, методами сравнения.

По своему назначению стандартные образцы исполняют роль мер, однако в отличие от «классических» мер, они имеют ряд особенностей. Стандартные образцы, как правило, не являются изделиями, они реализованы обычно в виде части или порции однородного вещества (материала), причем эта часть является полноценным носителем воспроизводимой единицы физической величины, а не ее части.

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

В зависимости от сферы действия и области применения стандартные образцы делятся на *государственные, отраслевые и стандартные образцы предприятий*. Тем стандартным образцам, которые включены в поверочные схемы, присваиваются разряды.

Стандартные образцы объединяются в типы. *Тип* — классификационная группа образцов, определяющими признаками которых являются одно и то же вещество, из которого они изготовлены, и единая документация по их выполнению. Типы стандартных образцов допускаются к применению при их утверждении и регистрации в соответствующем реестре. Для каждого типа стандартных образцов при их аттестации устанавливается срок действия (не более 10 лет) и определяются метрологические характеристики, которые нормируются в документации на их разработку и выпуск. К ним относятся:

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

- функции влияния — зависимость метрологических характеристик образца от изменения внешних влияющих величин в заданных условиях применения.

Возможно использование и других метрологических характеристик стандартных образцов.

Применение стандартных образцов должно осуществляться в соответствии с требованиями: нормативно-технических документов на методы измерений, испытаний, контроля, поверки и градуировки средств измерений; аттестованных методик выполнения измерений; государственных, ведомственных и локальных поверочных схем.

1.8. Государственная система обеспечения единства измерений

При проведении измерений требуется обеспечить их единство. Обеспечение единства измерений необходимо для достижения сопоставимых результатов измерений одних и тех же параметров, выполненных в разное время и в разных местах, с помощью разных методов и средств. Согласно Закону Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» под *единством измерений* понимают состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и они обеспечиваются с помощью единообразных средств измерений, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

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

Руководство деятельностью метрологической службы Российской Федерации и ее координацию осуществляет Госстандарт России. К субъектам метрологии относятся: Государственная метрологическая служба Российской Федерации (ГМС), метрологические службы федеральных органов власти и юридических лиц (МС) и международные метрологические организации.

Общие требования и основные метрологические правила установлены законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений». Конкретные метрологические нормы и правила изложены в нормативных документах (стандартах, правилах, рекомендациях и пр.). Комплекс стандартов и документов, устанавливающих правила, нормы и требования, обеспечивающие достижение и поддержание единства измерений составляют государственную систему обеспечения единства измерений (ГСОЕИ, проще — ГСИ).

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

Государственная метрологическая служба осуществляет главным образом контроль и надзор за:

- выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами, соблюдением метрологических правил и норм;
- количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже.

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

Воспроизведение и передача размеров единиц электрических величин

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

Воспроизведение единицы физической величины — это совокупность операций по материализации единицы физической величины с наивысшей в стране точностью посредством государственного эталона или исходного образцового средства измерений. Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы — это воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии с определением единицы. Оно осуществляется с помощью государственных первичных эталонов.

Воспроизведение производной единицы — это определение значения физической величины в указанных единицах на основании косвенных измерений других величин, функционально связанных с измеряемой.

Передача размера единицы — это приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру еди-

ницы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке или калибровке. Размер единицы передается «сверху вниз» — от более точных средств измерений к менее точным.

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

Хотя в России и создана мощная эталонная база, прямая передача размеров единиц физических величин от эталонов рабочим средствам измерений затруднена из-за их большого парка, находящегося в работе. Поэтому необходима промежуточная категория средств измерений, предназначенная для реализации на практике этой передачи, — образцовые средства измерения.

Образцовым средством измерений называется мера, измерительный прибор или преобразователь, утвержденные в качестве образцовых и служащие для поверки по ним других средств измерений. От образцовых средств измерений размеры единиц физических величин передаются далее рабочим мерам и измерительным приборам, т.е. рабочим средствам измерений.

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

Общие требования к образцовым средствам измерений, их метрологической аттестации и применению регламентируются стандартами и рекомендациями по метрологии. В частности, предусматривается создание образцовых средств измерений одной и той же физической величины нескольких уровней точности — *разрядов*. При этом образцовые средства измерений 1-го разряда считаются *исходными* и подлежат поверке непосредственно по рабочим эталонам. Образцовые средства измерений 2-го, 3-го и последующих разрядов являются *подчиненными* и подлежат поверке по образцовым средствам измерений 1-го, 2-го и последующих разрядов соответственно. Наконец, образцовые средства измерений могут объединяться в измерительные *поверочные* установки, позволяющие быстро выполнять все операции поверки.

При анализе схемы соподчиненности рабочего эталона с образцовыми средствами измерений, рабочими средствами измерений (мерами) и измерительными приборами надо помнить: образцовые средства измерений и измерительные приборы применяют для измерений, связанных с передачей размера единиц; рабочие средства измерений используют для измерений без передачи размера единиц.

Поверочные схемы. Обеспечение правильной передачи размера единиц физических величин во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем.

Поверочная схема — нормативный документ, который устанавливает соотношение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измерений с указанием методов и погрешности, и который утвержден в установленном порядке. Основные положения о поверочных схемах приведены в соответствующем стандарте. Поверочные схемы делятся на государственные, ведомственные и локальные.

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

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

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

Государственная поверочная схема разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к данному чертежу. Ведомственную и локальную поверочные схемы оформляют в виде соответствующего чертежа. Ведомственные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам для средств измерений одних и тех же физических величин. Они могут быть составлены при отсутствии государственной поверочной схемы. В них допускается указывать конкретные типы (экземпляры) средств измерений.

Поверочная схема устанавливает передачу размера единиц одной или нескольких взаимосвязанных величин. Она должна включать не менее двух ступеней передачи размера. Поверочную схему для средств измерений одной и той же величины, существенно отличающихся по диапазонам измерений, условиям применения и методам поверки, а также для средств измерений нескольких физических величин допускается подразделять на части. На чертежах поверочной схемы должны быть указаны:

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

Правила расчета параметров поверочных схем и оформления их чертежей приведены в соответствующих документах.

Так как поверочные схемы предназначены в общем случае для передачи размеров единиц величин от Государственных эталонов до объектов поверки с обеспечением возможности проведения метрологических испытаний (государственных, контрольных, поверки, аттестации и пр.) средств измерений различного класса точности, в их основу положен многоступенчатый принцип. Это значит, что поверочная схема должна состоять не менее чем из двух ступеней передачи размера единицы физической величины.

Чертежи поверочной схемы состоят из полей, расположенных друг под другом, и имеют такие наименования: «Эталоны», «Образцовые средства измерений n -го разряда», «Рабочие средства измерений». Упрощенная структура чертежа поверочной схемы представлена на рис. 1.8.

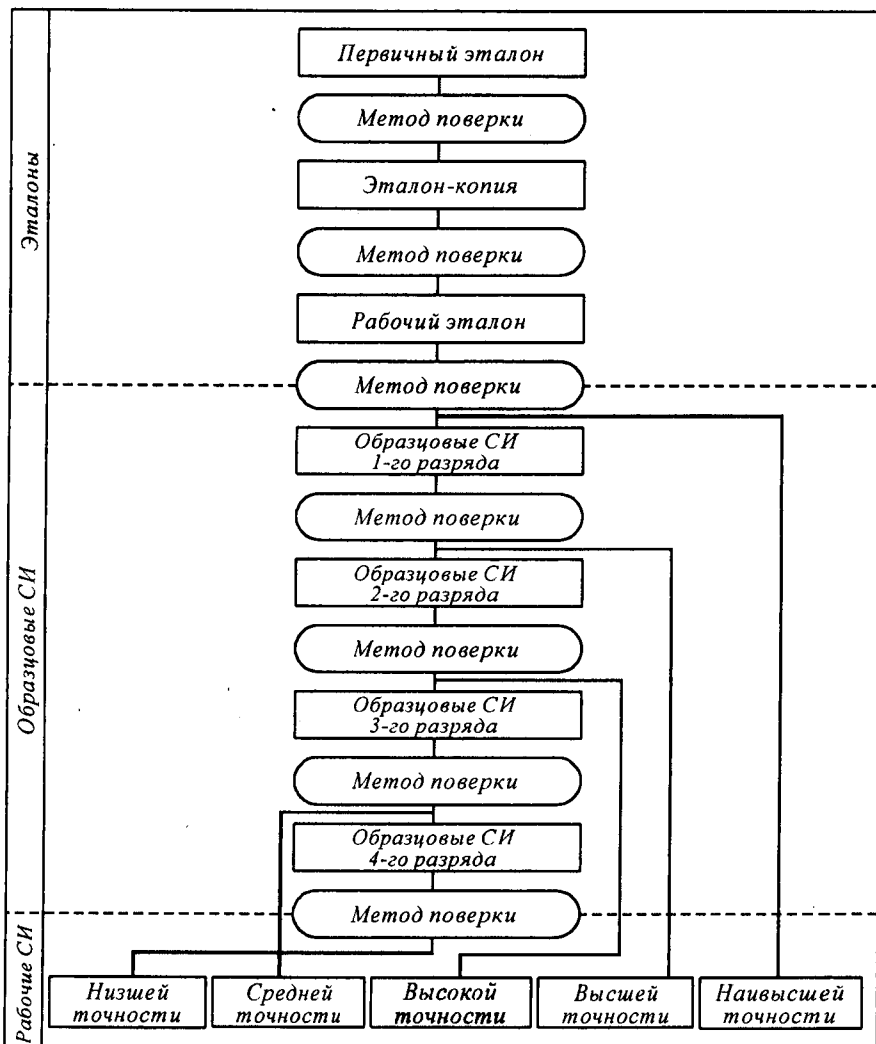


Рис. 1.8. Упрощенная структура чертежа поверочной схемы

Методы поверки (градуировки) средства измерений (СИ), указываемые в поверочной схеме, делятся на прямые или косвенные измерения, непосредственные (с масштабным преобразователем или без него), сличение при помощи средств сравнения (например, компаратора).

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

Для многофункциональных средств измерений (например, тестеров, ампервольтметров) используют ряд поверочных схем. В состав поверочных схем могут входить образцовые средства измерений, заимствованные из других поверочных схем, т.е. средства, разработанные для другой поверочной схемы. Так, в состав поверочной схемы средств измерений силы тока входят образцовые меры ЭДС и сопротивлений 2-го и 3-го разрядов.

Способы поверки средств измерений. Различают несколько видов поверки: государственную и ведомственную, периодическую и независимую, внеочередную и инспекционную, комплексную, поэтапную и др.

Основные требования к организации и порядку проведения поверки средств измерений приведены в правилах по метрологии, а также в ряде рекомендаций. Поверку выполняют метрологические службы, которым дано на это право. Средство измерений, признанное годным к применению, оформляется выдачей свидетельства о поверке, нанесением поверительного клейма или иными способами, устанавливаемыми нормативно-техническими документами.

Меры поверяются рядом методов:

- измерением воспроизводимой мерой величины измерительными приборами соответствующего класса точности; в этом случае поверка часто называется *градуировкой*;

- сличением с более точной мерой посредством компарирующего прибора: сличение мер с помощью компаратора осуществляется методами противопоставления или замещения — общим для этих методов поверки средств измерения является выработка сигнала о наличии разности размеров сравниваемых величин; если подбором образцовой меры этот сигнал будет сведен к нулю, то реализуется *нулевой метод* измерения;

- *калибровкой*, когда с более точной мерой сличается лишь одна мера набора или одна из отметок шкалы многозначной меры, а действительные размеры других мер определяются их взаимным сравнением в различных сочетаниях на приборах сравнения и при обработке результатов измерений.

Поверка измерительных приборов проводится путем:

- непосредственного сличения показаний поверяемого и некоторого образцового прибора при измерении одной и той же физической величины; основной данным методом служит одновременное измерение одного и того же

значения величины поверяемым и образцовым средствами измерений; разность показаний этих приборов равна абсолютной погрешности поверяемого средства измерений;

- непосредственного сравнения измеряемой величины и величины, воспроизводимой образцовой мерой соответствующего класса точности; значения величины на выходе меры выбираются равными оцифрованным отметкам шкалы прибора; наибольшая разность между результатами измерения и соответствующими им размерами мер является в этом случае основной погрешностью прибора.

Важным при поверке является выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями образцового и поверяемого средства измерений. Обычно на практике, когда при поверке вводят поправки на показания образцовых средств измерений, это соотношение принимается 1 : 3 (исходя из критерия ничтожно малой погрешности — ошибка I рода). Если же поправки не вводят, то образцовые средства измерений выбирают из соотношения 1 : 5 (ошибка II рода). Соотношение допускаемых погрешностей поверяемых и образцовых средств измерений устанавливается с учетом принятого метода поверки, характера погрешностей, допускаемых значений ошибок I и II родов и иногда может значительно отличаться от указанных ранее цифр.

Контрольные вопросы

1. Что изучает дисциплина метрология?
2. Из каких основных разделов состоит метрология?
3. Какое место занимает метрология среди других наук?
4. Дайте определение физической величины.
5. Что такое размерность физической величины?
6. Дайте определение системы физических величин.
7. Приведите примеры основных, дополнительных и производных физических величин.
8. Проанализируйте определения счета, оценивания и измерения. Выделите их общие и отличительные признаки.
9. Назовите основные операции процедуры измерения.
10. По каким признакам классифицируются методы измерений?
11. Что такое принцип, метод и методика измерений?
12. Какие методы измерений вам известны?
13. Что такое условия измерений? Какими они бывают?
14. Что такое результат измерения и чем он характеризуется?
15. Дайте определения прямых, косвенных, совместных и совокупных видов измерений.
16. Приведите примеры измерений каждого вида.
17. Что такое контроль и чем он отличается от измерения?
18. Что такое шкала физической величины?

19. Приведите примеры различных шкал физических величин.
20. Что представляют собой метрологические понятия счета, испытания, контроля и поверки?
21. Чем испытание отличается от измерения?
22. Что представляет собой средство измерений?
23. По каким признакам классифицируют средства измерений?
24. Приведите примеры средств измерений различных физических величин.
25. Что собой представляют измерительные приборы?
26. По каким признакам классифицируют измерительные приборы?
27. Какими параметрами и характеристиками описываются современные измерительные приборы?
28. Что представляет собой измерительная система?
29. Для каких целей предназначены информационно-измерительные системы, измерительно-вычислительные комплексы и компьютерно-измерительные системы?
30. Что такое эталон физической величины?
31. Какие основные эталоны вы знаете?
32. Расскажите о государственных эталонах основных единиц.
33. Для чего используются стандартные образцы?
34. Каким образом осуществляется воспроизведение и передача размеров единиц электрических величин?
35. Что такое поверочная схема и для каких целей она применяется?
36. Какие способы поверки средств измерений вы знаете?

Глава 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Целью любых измерений является получение результата, т. е. оценки истинного значения физической величины. Однако какими бы точными и совершенными не были средства и методы измерений и как бы тщательно измерения не выполнялись, *их результат всегда отличается от истинного значения измеряемой физической величины, т. е. находится с некоторой погрешностью*. Погрешности появляются из-за несовершенства применяемых методов и средств измерений, непостоянства влияющих на результат измерения физических величин и индивидуальных особенностей экспериментатора. Кроме того, на точность измерений влияют внешние и внутренние помехи, климатические условия и порог чувствительности измерительного прибора.

2.1. Общие сведения

Оценивая погрешности измерения, следует понимать, что уровень точности, к которому необходимо стремиться, должен определяться критериями технической и экономической целесообразности. В метрологии установлено, что увеличение точности измерения вдвое удорожает само измерение в два-три раза. В то же время снижение точности измерения в производстве ниже определенной нормы приводит к появлению существенного брака изделий. При установлении точности измерений важно также учитывать их значимость. В одних случаях недостаточная точность получаемой измерительной информации имеет небольшое или локальное значение, в других — играет исключительно важную роль: от точности измерения могут зависеть как здоровье и жизнь людей, так и научное открытие.

Если прямое измерение физической величины проведено один раз — так называемое однократное прямое измерение, то результатом измерения являются непосредственное показание средства измерения. При этом за погрешность результата измерения часто принимают погрешность средства измерения.

В случае многократных наблюдений результат измерения и его погрешность находят различными методами статистической обработки всех выполненных наблюдений.

Измерение можно считать законченным, если найден не только результат измерения, но и проведена оценка его погрешности.

2.2. Погрешности измерений и их классификация

В метрологии определение «погрешность» является одним из центральных, причем в нем отражены понятия «погрешность результата измерения» и «погрешность средства измерения». Эти два понятия близки друг к другу и обычно классифицируются по одинаковым признакам.

Погрешностью измерения называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то при количественной оценке погрешности пользуются *действительным значением физической величины*. Это значение находится экспериментальным путем и настолько близко к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может быть использовано вместо него.

Погрешность средства измерения определяется разностью между показаниями средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины. Она характеризует точность результатов измерений, проводимых используемым средством.

Как одна из основных характеристик результата измерения, погрешность должна быть обязательно оценена. Для различных видов измерений проблема оценки погрешности может решаться по-разному. Погрешность результата измерения можно оценить с разной точностью на основании различной исходной информации. В соответствии с этим различают измерения с точной, приближенной и предварительной оценкой погрешностей.

При измерениях с *точной оценкой погрешности* учитывают индивидуальные метрологические свойства и характеристики каждого из примененных средств измерения, анализируют метод измерений, контролируют условия измерений с целью учета их влияния на результат измерения.

Если измерения ведут с *приближенной оценкой погрешности*, то учитывают лишь метрологические характеристики средства измерения и оценивают влияние на их результат только отклонения условий измерения от нормальных.

Измерения с *предварительной оценкой погрешности* выполняются по типовым методикам, регламентированным нормативными документами, в которых указаны методы и условия измерений, типы и погрешности используемых средств измерений и на основе этих данных заранее оценена возможная погрешность результата.

Рассмотрим основные признаки, по которым классифицируют погрешности (рис.2.1).

По форме количественного выражения погрешности измерения разделяются на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютной погрешностью Δ , выражаемой в единицах измеряемой величины, называется отклонение результата измерения x от истинного значения $x_{\text{и}}$



Рис. 2.1. Классификация погрешностей измерений

$$\Delta = x - x_{\text{н}}. \quad (2.1)$$

Разновидностью абсолютной погрешности является *предельная погрешность* Δ_m — погрешность, больше которой в данном измерительном эксперименте не может появиться.

Абсолютная погрешность характеризует величину и знак полученной погрешности, но не определяет качество самого измерения.

Характеристикой качества измерения является *точность измерений*, отражающей меру близости результатов измерений к истинному значению измеряемой величины. Иначе говоря, высокой точности измерений соответствует малая погрешность. Так, например, измерение силы тока в 10 А и 100 А может быть выполнено с идентичной абсолютной погрешностью $\Delta = +1$ А. Однако качество первого измерения хуже второго. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать качество измерений, используют относительную погрешность.

Относительной погрешностью δ называется отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta / x_{\text{н}}. \quad (2.2)$$

Мерой точности измерений служит показатель, обратный модулю относительной погрешности: $K_r = 1/|\delta|$. Относительную погрешность δ часто выражают в процентах: $\delta = 100\Delta/x_n$ (%). Так как обычно $\Delta \ll x_n$, то относительная погрешность может быть определена как $\delta \approx \Delta/x$ или $\delta \approx 100\Delta/x$ (%).

Если измерение выполнено однократно и за абсолютную погрешность результата измерения Δ принята разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины x_n , то из (2.2) следует, что значение относительной погрешности δ уменьшается с ростом x_n (здесь предполагается независимость Δ от x_n). Поэтому для измерений целесообразно выбирать такой прибор, показания которого были бы в последней части его шкалы (диапазона измерений), а для сравнения различных приборов использовать понятие приведенной погрешности.

Приведенной погрешностью γ , выражающей потенциальную точность измерений, называется отношение абсолютной погрешности Δ к некоторому нормирующему значению X_N (например, к конечному значению шкалы прибора или сумме значений шкал при двусторонней шкале):

$$\gamma = 100 \frac{\Delta}{X_N} \% \quad (2.3)$$

По характеру (закономерности) проявления погрешности измерений подразделяются на три основных класса: систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематические погрешности Δ_c — составляющие погрешности измерений, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при многократных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях. Такие погрешности могут быть выявлены путем детального анализа возможных их источников и уменьшены введением соответствующей поправки, применением более точных приборов, калибровкой приборов с помощью рабочих мер и т. п. Однако полностью их устранить нельзя.

Случайные погрешности Δ — составляющие погрешности измерений, изменяющиеся случайным образом по значению и знаку при повторных измерениях одной и той же физической величины в одних и тех же условиях.

Данные погрешности проявляются при повторных измерениях одной и той же физической величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Практически случайные погрешности неизбежны, неустраняемы и всегда имеют место в результате измерения. Их описание и оценка возможны только на основе теории вероятностей и математической статистики.

Случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений введением поправки. Однако их можно уменьшить путем многократного измерения физической величины и последующей статистической обработкой полученных результатов.

Грубые погрешности (промахи) — погрешности, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях измерения. Данные погрешности возникают из-за ошибок оператора или неучтенных внешних воздействий. В случае однократного измерения обнаружить промахи нельзя. При этом целесообразно выполнить два-три измерения и за результат принять их среднее арифметическое значение. При многократных наблюдениях промахи выявляются в процессе обработки их результатов и исключают из рассмотрения, пользуясь определенными правилами (см. гл 3).

Таким образом, если не учитывать промахи, абсолютная погрешность измерения Δ , определяемая выражением (2.1), представляется суммой систематической Δ_c и случайной $\dot{\Delta}$ составляющих:

$$\Delta = \Delta_c + \dot{\Delta}. \quad (2.4)$$

Это означает, что абсолютная погрешность, как и результат измерения, является *случайной* величиной.

По причинам возникновения (по виду источника) погрешности измерения подразделяются на методические, инструментальные, внешние и субъективные (личные).

Методические погрешности возникают из-за несовершенства метода измерений, некорректности алгоритмов или формул, по которым производятся вычисления результатов измерений, отличия принятой модели объекта измерения от той, которая правильно описывает его свойство, определяемое путем измерения, а также из-за влияния выбранного средства измерения на измеряемые параметры сигналов.

Если, например, вольтметр имеет недостаточно высокое входное сопротивление, то его подключение к схеме способно изменить в ней распределение токов и напряжений. При этом результат измерения будет отличаться от действительного.

Пример 2.1. Рассмотрим появление методической погрешности при измерении сопротивления методом вольтметра-амперметра (рис. 2.2). Для определения значения сопротивления R_x резистора необходимо измерить ток I_R , протекающий через резистор и падение напряжения на нем U_R . В приведенной схеме, реализующей этот метод, падение напряжения на резисторе измеряется вольтметром непосредственно, в то время как амперметр измеряет суммарный ток, часть которого протекает через резистор, часть через вольтметр. В результате измеренное значение

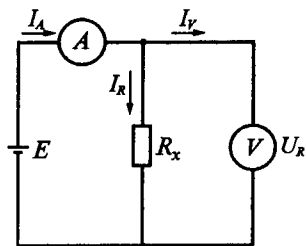


Рис. 2.2. К появлению методической погрешности

сопротивления будет не $R_x = \frac{U_R}{I_R}$, а $R' = \frac{U_R}{I_R + I_V}$ и появляется методическая по-

грешность измерения $\Delta R = R' - R_x$. Методическая погрешность уменьшается и стремится к нулю при токе $I_V \rightarrow 0$, т.е. при внутреннем сопротивлении вольтметра $R_V \rightarrow \infty$.

Методическую погрешность можно уменьшить путем применения более точного метода измерения.

Инструментальные (аппаратурные, приборные) погрешности возникают из-за несовершенства средств измерения, т.е. от их погрешностей. Источниками инструментальных погрешностей могут быть, например, неточная градуировка прибора и смещение нуля, вариация показаний прибора в процессе эксплуатации и т. п. Уменьшить инструментальные погрешности можно, применяя более точный прибор.

Внешняя погрешность — важная составляющая погрешности измерения, связанная с отклонением одной или нескольких влияющих величин от нормальных значений или выходом их за пределы нормальной области (например, влияние влажности, температуры, внешних электрических и магнитных полей, нестабильности источников питания, механических воздействий и т.д.). В большинстве случаев внешние погрешности измерений относятся к систематическим и определяются дополнительными погрешностями применяемых средств измерений.

Субъективные погрешности вызываются ошибками оператора при отсчете показаний средств измерения (погрешности от небрежности и невнимания оператора, от параллакса, т.е. от неправильного направления взгляда при отсчете показаний стрелочного прибора и пр.). Подобные погрешности устраняются применением цифровых приборов или автоматических методов измерения.

По характеру поведения измеряемой величины в процессе измерений различают статические и динамические погрешности.

Статические погрешности возникают при измерении установившегося значения измеряемой физической величины, т.е. когда эта величина перестает изменяться во времени.

Динамические погрешности имеют место при динамических измерениях, когда измеряемая величина изменяется во времени и требуется установить закон ее изменения. Причина появления динамических погрешностей состоит в несоответствии скоростных (временных) характеристик прибора и скорости изменения измеряемой величины.

По условиям эксплуатации средства измерений, различают основную и дополнительную погрешности.

Основная погрешность средств измерений имеет место при нормальных условиях эксплуатации, оговоренных в регламентирующих документах (паспорте, технических условиях и т. п.).

Дополнительная погрешность средств измерений, возникает вследствие выхода какой-либо из влияющих величин (температуры, влажности и др.) за пределы нормальной области значений.

Пример 2.2. Вольтметр предназначен для измерения переменного тока с номинальным значением частоты (50 ± 5) Гц. Отклонение частоты за эти пределы приведет к дополнительной погрешности измерения.

Классификация погрешностей измерений носит достаточно условный характер. Ответы на вопросы об отнесении погрешности конкретного измерения к тому или иному классу и о делении ее на систематические и случайные можно дать только при наличии полной информации о свойствах параметров и характеристик измеряемого объекта средств измерений, условий, в которых проводились измерения, а также после осуществления многочисленных повторных измерений.

Так, например, при изготовлении измерительных мостов разброс сопротивлений их резисторов можно считать случайными погрешностями, в то время как в конкретном собранном мосте этот разброс следует отнести к систематическим погрешностям измерительного моста. Другим наглядным примером может служить погрешность измерительного прибора, вызванная климатическими изменениями в процессе измерений. Если возможен контроль температуры, при которой проводятся измерения какой-либо величины, и имеется поправочная таблица, то такую погрешность следует рассматривать как систематическую. Однако при отсутствии контроля температур эта же погрешность учитывается как случайная.

2.3. Систематические погрешности

В основу классификации систематических погрешностей положена закономерность их поведения во времени.

По характеру изменения во времени систематические погрешности подразделяют на постоянные и переменные.

Постоянными называются такие систематические погрешности измерения, которые остаются неизменными в течение всей серии измерений (сохраняют величину и знак). Например, погрешности из-за ошибки установки нуля вольтметра или калибровки осциллографа и т.п.

Переменными называются погрешности, изменяющиеся в процессе измерения. Наличие существенной переменной систематической погрешности искажает оценки характеристик случайной погрешности. Поэтому она должна обязательно выявляться и исключаться из результатов измерений.

Переменные погрешности подразделяют на *монотонно изменяющиеся, периодические и прогрессирующие*.

Монотонно изменяющейся является систематическая погрешность, которая в процессе измерения монотонно возрастает или убывает. Данная погрешность имеет место, например, при постепенном разряде батареи, питающей средство измерений. Чаще всего такие погрешности изменяются по линейному закону.

Периодической называется погрешность, значение которой является периодической функцией времени. Примером может служить погрешность, вызванная суточными колебаниями напряжения силовой питающей сети, температуры окружающей среды и др.

Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность — непредсказуемая погрешность измерений, достаточно медленно меняющаяся во времени. Отличительные особенности прогрессирующих погрешностей:

- их можно скорректировать поправками только в данный момент времени, а далее они вновь непредсказуемо изменяются;
- изменения прогрессирующих погрешностей во времени — нестационарный случайный процесс, и поэтому в рамках хорошо разработанной теории стационарных случайных процессов они могут быть описаны лишь с известными оговорками.

Систематические погрешности могут изменяться и по более сложному закону, обусловленному какими-либо внешними причинами.

Методы исключения систематических погрешностей

Результаты измерений, содержащие систематическую погрешность, относятся к *неисправленным*. При проведении измерений стремятся исключить, уменьшить или учесть влияние систематических погрешностей. Однако вначале их надо обнаружить.

Постоянные систематические погрешности можно обнаружить только путем сравнения результатов измерений с другими, полученными с использованием более точных методов и средств измерения. В ряде случаев такие погрешности можно устранить, используя специальные методы измерений.

Рассмотрим наиболее известные методы исключения (существенного уменьшения) постоянных систематических погрешностей.

Метод замещения обеспечивает наиболее полное решение задачи компенсации постоянной систематической погрешности. Суть метода состоит в такой замене измеряемой величины x_n известной величиной A , получаемой с помощью регулируемой меры, чтобы показание измерительного прибора сохранилось неизменным. Значение измеряемой величины считается в этом случае по указателю меры.

При использовании данного метода погрешность неточного измерительного прибора устраняется, а погрешность измерения определяется только

погрешностью самой меры и погрешностью отсчета измеряемой величины по указателю меры.

Пример 2.3. Измерялось сопротивление резистора R_x омметром малой точности. Результат измерения равен $x = R_x + \Delta_c$, где x и Δ_c — соответственно показание омметра и систематическая погрешность измерения. Заменяв R_x магазином сопротивлений и отрегулировав его так, чтобы сохранилось показание омметра, получим $x = R_m + \Delta_c$. Из приведенных двух выражений для x следует, что $R_x = R_m$.

Метод компенсации погрешности по знаку (метод двух отсчетов или изменения знака систематической погрешности) используется для устранения постоянной систематической погрешности, у которой в зависимости от условий измерения изменяется только знак. При этом методе выполняют два измерения, результаты которых должны быть равны $x_1 = x_n + \Delta_c$ и $x_2 = x_n - \Delta_c$, где x_n — измеряемая величина. Среднее значение из полученных результатов $(x_1 + x_2)/2 = x_n$ представляет собой окончательный результат измерения, не содержащий погрешности $\pm \Delta_c$. Данный метод часто используется при измерении экстремальных значений (максимума и нуля) неизвестной величины.

Пример 2.4. Измерить значение ЭДС потенциометром постоянного тока, который обладает паразитной термоЭДС.

Решение. Уравновесив потенциометр и выполнив первое измерение, получаем ЭДС U_1 . Затем меняем полярность измеряемой ЭДС, а значит и направление тока в потенциометре. Снова проводим его уравновешивание и в результате второго измерения получаем значение U_2 . Если термоЭДС дает погрешность ΔU и напряжение $U_1 = U_x + \Delta U$, то $U_2 = U_x - \Delta U$. Отсюда напряжение $U_x = (U_1 + U_2)/2$. Итак, систематическая погрешность, обусловленная действием термоЭДС потенциометра, устранена.

Метод противопоставления применяется в радиоизмерениях для уменьшения постоянных систематических погрешностей при сравнении измеряемой величины с известной величиной примерно равного значения, воспроизводимой соответствующей образцовой мерой. Этот метод является разновидностью метода сравнения, при котором измерение выполняется дважды и проводится так, чтобы в обоих случаях причина постоянной погрешности оказывала разные, но известные по закономерности воздействия на результаты наблюдений.

Пример 2.5. Измерить сопротивление резистора с помощью одинарного моста (см. далее) методом противопоставления.

Решение. Сначала измеряемое сопротивление R_x уравновешивают образцовой мерой — известным сопротивлением R_1 , включенным в плечо сравнения моста. При

этом $R_x = R_1 R_3 / R_4$, где R_3, R_4 — сопротивления плеч моста. Затем резисторы R_x и R_1 меняют местами и вновь уравнивают мост, регулируя сопротивление образцового резистора $R_1 = R'_1$. В этом случае $R_x = R'_1 R_3 / R_4$. Из двух уравнений для R_x исключается отношение R_3 / R_4 . Тогда $R_x = \sqrt{R_1 R'_1}$.

Метод рандомизации (от англ. *random* — случайный, беспорядочный; в переводе на русский означает: перемешивание, создание беспорядка, хаоса) основан на принципе перевода систематических погрешностей в случайные.

Этот метод позволяет эффективно уменьшать постоянную систематическую погрешность (методическую и инструментальную) путем измерения некоторой величины рядом однотипных приборов с последующей оценкой результата измерений в виде математического ожидания (среднего арифметического значения) выполненного ряда наблюдений. В данном методе при обработке результатов измерений используются случайные изменения погрешности от прибора к прибору. Уменьшение систематической погрешности достигается и при изменении случайным образом методики и условий проведения измерений.

Поясним действие метода рандомизации простым примером. Пусть некоторая физическая величина измеряется n (число n достаточно велико) однотипными приборами, имеющими систематические погрешности одинакового происхождения. Для одного прибора эта погрешность — величина постоянная, но от прибора к прибору она изменяется случайным образом. Поэтому, если измерить неизвестную величину n приборами и затем вычислить математическое ожидание всех результатов, то значение погрешности существенно уменьшится (как и в случае усреднения случайной погрешности).

Метод введения поправок. Довольно часто систематические погрешности могут быть вычислены и исключены из результата измерения с помощью поправки. *Поправка C* — величина, одноименная с измеряемой x_n , которая вводится в результат измерения $x = x_n + \Delta_c + C$ с целью исключения систематической погрешности Δ_c . В случае $C = -\Delta_c$, систематическая погрешность полностью исключается из результата измерения. Поправки определяются экспериментально или путем специальных теоретических исследований и задаются в виде формул, таблиц или графиков.

Наиболее просто методом введения поправок исключают постоянные инструментальные систематические погрешности, которые обычно выявляют посредством поверки средства измерения.

Пример 2.6. При измерении напряжения в сети переменного тока показания вольтметра составили 218 В. В свидетельстве о поверке прибора указано, что на этой отметке его шкалы систематическая погрешность вольтметра составляет -2 В. С учетом поправки напряжение в сети равно $218 + 2 = 220$ В.

Пример 2.7. Напряжение источника ЭДС U_x измерено вольтметром, сопротивление которого $R_V = 5$ кОм определено с погрешностью $\pm 0,5\%$. Внутреннее сопротивление источника ЭДС $R_i = 60 \pm 10$ Ом. Показание вольтметра $U_V = 12,50$ В. Найти поправку, которую нужно внести, и показание прибора для определения действительного значения напряжения источника.

Решение. Показания вольтметра соответствуют падению напряжения на нем:

$$U_V = \frac{R_V}{R_i + R_V} U_x.$$

Относительная систематическая методическая погрешность, обусловленная ограниченным значением сопротивления R_V ,

$$\delta_c = \frac{U_V - U_x}{U_x} 100\% = -100 \frac{R_i}{R_i + R_V} = -100 \frac{60}{5050} = -1,2\%.$$

Поправка измерения напряжения равна абсолютной систематической погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\Delta_c = 12,50 \cdot 0,012 = 0,15 \text{ В.}$$

Погрешность полученного значения поправки определяется погрешностью, с которой известно сопротивление R_V , а это $\Delta = \pm 10$ Ом. Ее предельное значение составит $\Delta_{cR_V} = 10/60 = 0,167$. Погрешностью $\Delta_{R_V} = 0,005$ неточности оценки R_V можно пренебречь. Следовательно, погрешность определения поправки $\Delta = \pm 0,167 \cdot 0,15 = \pm 0,0251 \approx \pm 0,03$ В.

Итак, в показания вольтметра необходимо ввести поправку: $\Delta U = +0,15$ В. Тогда исправленное значение $U'_x = 12,5 + 0,15 = 12,65$ В. Этот результат имеет определенную погрешность, в том числе неисключенный остаток систематической погрешности $\Delta = \pm 0,03$ В или $\delta = \pm 0,24\%$ из-за потребления некоторой мощности вольтметром.

Ввод одной поправки позволяет исключить влияние только одной составляющей систематической погрешности. Для устранения всех составляющих, в результат измерения приходится вводить ряд поправок.

Рассмотрим далее некоторые методы, применяющиеся для обнаружения и уменьшения переменных и монотонно изменяющихся во времени систематических погрешностей.

Метод симметричных наблюдений весьма эффективен при выявлении и исключении погрешности, являющейся линейной функцией соответствующего аргумента (амплитуды, напряжения, времени, температуры и т. д.).

Предположим, что измеряется величина x_n , а результаты наблюдений x_i зависят от времени t . Для выявления характера изменения погрешности выполняют несколько наблюдений через равные промежутки времени Δt . Пусть

выполнено пять наблюдений $x_1 \dots x_5$ в моменты времени $t_1 \dots t_5$. Далее вычисляют средние арифметические значения двух пар наблюдений $(x_1 + x_5)/2$ и $(x_2 + x_4)/2$. Наблюдения в этих парах проведены в моменты t_1, t_5 и t_2, t_4 , симметричные относительно момента t_3 . При линейном характере изменения погрешности, полученные средние значения должны быть одинаковы. Убедившись в этом, результаты наблюдений можно записать в виде $x_i = x_n + kt_i$, где k — некоторая постоянная. Пусть $x_1 = x_n + kt_1$ и $x_2 = x_n + kt_2$. Решение системы этих уравнений дает значение x_n , свободное от переменной систематической погрешности: $x_n = (x_2 t_1 - x_1 t_2)/(t_2 - t_1)$. Подобным образом удастся исключить погрешности, обусловленные, например, постепенным падением уровня напряжения источника питания (аккумулятора, батареи).

Метод анализа знаков неисправленных случайных погрешностей. Когда знаки неисправленных случайных погрешностей чередуются с некоторой закономерностью, имеет место переменная систематическая погрешность. Если у случайных погрешностей последовательность знаков «+» сменяется последовательностью знаков «-» или наоборот, то присутствует монотонно изменяющаяся систематическая погрешность. Если же у случайных погрешностей группы знаков «+» и «-» чередуются, то имеет место периодическая систематическая погрешность.

Графический метод является наиболее простым для обнаружения переменной систематической погрешности в ряде результатов наблюдений. При этом методе рекомендуется построить график, на который нанесены результаты наблюдений в той последовательности, в какой они были получены. На графике через точки наблюдений проводят плавную линию, которая выражает тенденцию результата измерения, если она существует. Если тенденция не прослеживается, то переменную систематическую погрешность считают практически отсутствующей.

В заключение отметим, что при измерениях всегда остаются *неисключенные остатки систематических погрешностей* (НСП). Порядок их учета при оценке погрешности результатов прямых измерений с многократными наблюдениями рассмотрен в разделе 3.

2.4. Случайные погрешности

Для удобства анализа ниже предполагается, что абсолютная погрешность результата измерений (2.4) является только случайной, т. е. $\Delta = \dot{\Delta}$, и далее обозначается как Δ .

Описание и оценка случайных погрешностей

Аналитически случайные погрешности измерений описывают и оценивают с помощью аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Наиболее общей характеристикой случайной величины (в данном случае случайной погрешности Δ) является закон (функция) ее распределения. В математике известны две формы описания этого закона: дифференциальная и интегральная.

Дифференциальным законом распределения случайной погрешности Δ или плотностью распределения вероятностей (плотностью вероятностей) случайной погрешности Δ называется функция $p(\Delta) = dF(\Delta)/d\Delta$, где $dF(\Delta)$ — вероятность нахождения значений погрешности Δ в интервале $d\Delta$. В данном случае дифференциальный закон $p(\Delta)$ является одномерным.

Интегральным законом распределения случайной погрешности Δ называется функция $F(\Delta_r)$, выражающая вероятность P того, что случайная погрешность находится в интервале от $-\infty$ до некоторого значения, меньшего граничного Δ_r :

$$F(\Delta_r) = P(-\infty < \Delta < \Delta_r) = \int_{-\infty}^{\Delta_r} p(\Delta) d\Delta. \quad (2.5)$$

Функция $F(\Delta_r)$ неубывающая и определена так, что $F(-\infty) = 0$ и $F(\infty) = 1$.

Практический интерес представляет поиск вероятности P , с которой погрешность измерений Δ находится в некотором заданном интервале погрешностей $(\Delta_{r1}, \Delta_{r2})$, где Δ_{r1} и Δ_{r2} — нижняя и верхняя границы этого интервала. Записывается эта вероятность как $P(\Delta_{r1} < \Delta < \Delta_{r2})$ и в общем случае $0 \leq P \leq 1$. Если $P = 0,6$ и выполнено, например, сто измерений, то можно считать, что шестьдесят значений Δ попадают в интервал $(\Delta_{r1}, \Delta_{r2})$.

Для определения вероятности $P(\Delta_{r1} < \Delta < \Delta_{r2})$ можно использовать и интегральный и дифференциальный законы распределения погрешности Δ :

$$P(\Delta_{r1} < \Delta < \Delta_{r2}) = F(\Delta_{r2}) - F(\Delta_{r1}); \quad (2.6)$$

$$P(\Delta_{r1} < \Delta < \Delta_{r2}) = \int_{\Delta_{r1}}^{\Delta_{r2}} p(\Delta) d\Delta. \quad (2.7)$$

В метрологии чаще используется дифференциальный закон, так как он описывает свойства случайной погрешности с большей наглядностью.

Из физических представлений следует, что вероятность нахождения погрешности Δ на интервале всех возможных значений погрешностей измерений, т.е. в общем случае на интервале $(-\infty, \infty)$:

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

Выражение (2.8) в математике называется *условием нормирования плотности распределения вероятностей* $p(\Delta)$. Оно означает, что площадь под графиком любой функции $p(\Delta)$ на интервале всех ее значений должна быть равна единице.

Законы распределения $p(\Delta)$ могут быть симметричными или несимметричными относительно центра распределения погрешности. В дальнейшем рассматриваются только симметричные законы как наиболее распространенные в практической метрологии.

Описание случайных погрешностей с помощью законов распределения $p(\Delta)$ является наиболее полным, но экспериментальное определение этих законов требует весьма больших затрат времени. Однако во многих практических случаях нет необходимости описывать случайную погрешность полностью, а достаточно охарактеризовать числами лишь отдельные ее свойства. Такие числовые характеристики в теории вероятностей и математической статистике называют *моментами*.

Для рассматриваемых ниже симметричных законов $p(\Delta)$ применяется в основном центральный момент второго порядка, называемый *дисперсией*:

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 p(\Delta) d\Delta. \quad (2.9)$$

Дисперсия D характеризует рассеяние погрешностей относительно центра распределения $\Delta = 0$. Так как D имеет размерность квадрата погрешности, то обычно используется *среднее квадратическое отклонение* (СКО) $\sigma = \sqrt{D}$, которое имеет размерность самой погрешности.

В практике измерений наиболее часто используются нормальный (Гаусса), равномерный, трапецеидальный, треугольный (Симпсона) законы, а также закон распределения Стьюдента и другие.

Нормальный закон распределения погрешностей применяется при следующих предположениях:

- погрешность может принимать непрерывный ряд значений в интервале $\pm \infty$;
- при выполнении значительного числа наблюдений большие погрешности Δ появляются реже, чем малые, а частота появления погрешностей, идентичных по абсолютной величине и противоположных по знаку, одинакова.

Для нормального закона распределения:

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

где σ — *среднее квадратическое отклонение* погрешности Δ характеризует точность выполненных измерений.

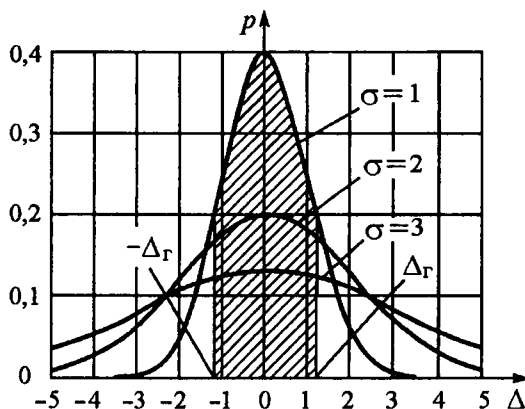


Рис. 2.3. Графики нормального закона распределения

Чем σ меньше, тем выше точность измерений. Это следует из графиков функции (2.10), приведенных на рис.2.3 для различных значений σ . По мере уменьшения СКО σ рассеяние случайных погрешностей Δ относительно центра их распределения, т.е. в данном случае относительно значения $\Delta = 0$, уменьшается.

При нормальном законе формула для расчета вероятности $P(\Delta_{r1} < \Delta < \Delta_{r2})$ находится подстановкой (2.10) в (2.7). Для случая $\Delta_{r1} = -\Delta_r$ и $\Delta_{r2} = \Delta_r$, т. е. для симметричного интервала $(-\Delta_r, \Delta_r)$:

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

Отметим геометрическую интерпретацию вероятности (2.11). На графике плотности вероятности для конкретного СКО σ (рис. 2.3) вероятность численно равна площади S заштрихованной фигуры, ограниченной функцией $p(\Delta)$, отрезком оси погрешностей Δ от $-\Delta_r$ до Δ_r и ординатами $p(-\Delta_r)$, $p(\Delta_r)$. Чем шире заданный интервал погрешностей $(-\Delta_r, \Delta_r)$, тем больше площадь S , т.е. больше вероятность попадания случайных погрешностей измерений Δ в этот интервал. Для интервала погрешностей измерений $(-\infty, \infty)$ вероятность $P(-\infty < \Delta < \infty) = 1$.

Для вычисления вероятности (2.11) удобно в интеграле заменить переменную Δ на $t = \Delta/\sigma$. При этом его верхний предел заменяется на $z = \Delta_r/\sigma$, а правая часть выражения (2.11) преобразуется в табулированный интеграл $\Psi(z)$, называемый *интегралом вероятностей*:

$$P(-z < t < z) = \Psi(z) = 2\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (2.12)$$

Отметим, что функция $\Phi(z)$, называемая *функцией Лапласа*, выражает вероятность попадания случайной величины t в интервал $(0, z)$.

График функции $\Psi(z)$ дан на рис.2.4, а ее значения приведены в табл. 2.1.

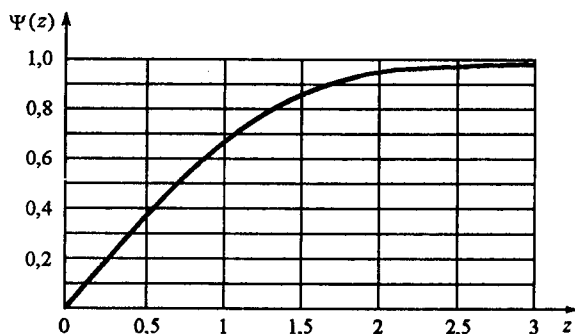


Рис. 2.4. График значений функции $\Psi(z)$ для $z \geq 0$

Задаваясь границей Δ_r в долях σ , находят $z = \Delta_r/\sigma$, а затем искомую вероятность по таблицам функции $\Psi(z)$. При необходимости можно выполнить обратный поиск, т. е. по заданной вероятности $\Psi(z)$ найти z , далее $\Delta_r = z\sigma$ и интервал $(-\Delta_r, \Delta_r)$.

Таблица 2.1. Значения интеграла вероятностей $\Psi(z)$

z	$\Psi(z)$	z	$\Psi(z)$	z	$\Psi(z)$	z	$\Psi(z)$
0,00	0,000	0,70	0,516	1,40	0,839	2,25	0,976
0,10	0,080	0,80	0,576	1,50	0,866	2,50	0,988
0,20	0,159	0,90	0,632	1,60	0,890	2,75	0,994
0,30	0,236	1,00	0,683	1,70	0,911	3,00	0,9973
0,40	0,311	1,10	0,729	1,80	0,928	3,30	0,9990
0,50	0,383	1,20	0,770	1,90	0,943	3,50	0,9995
0,60	0,452	1,30	0,806	2,00	0,955	4,00	0,9999

С помощью графика (рис. 2.4) или табл. 2.1 можно найти значения вероятностей (2.11) для некоторых, имеющих практическое значение интервалов погрешностей $(-\Delta_r, \Delta_r)$, представленных в долях σ :

$$\begin{aligned} P(-2\sigma/3 < \Delta < 2\sigma/3) &= 0,5; & P(-\sigma < \Delta < \sigma) &= 0,683; \\ P(-3\sigma < \Delta < 3\sigma) &= 0,997; & P(-\infty < \Delta < +\infty) &= 1. \end{aligned} \quad (2.13)$$

В соответствии со значениями этих вероятностей погрешность результатов измерений, равная $(2/3)\sigma$, названа *равновероятной* (поскольку $P = 0,5$). Погрешность, равная 3σ , принята в радиотехнике за *максимальную* и записывается в виде $M = 3\sigma$. При $P = 0,997$ из тысячи выполненных измерений только три их погрешности Δ выходят за пределы интервала $(-3\sigma, 3\sigma)$.

Соответствующий интегралу (2.12) закон распределения, представленный в зависимости от относительного безразмерного аргумента $t = \Delta/\sigma$, называется *нормированным нормальным законом* и задается выражением:

$$p_n(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (2.14)$$

График нормированного нормального закона приведен на рис. 2.5. По форме он совпадает графиком нормального закона (2.10), когда СКО $\sigma = 1$.

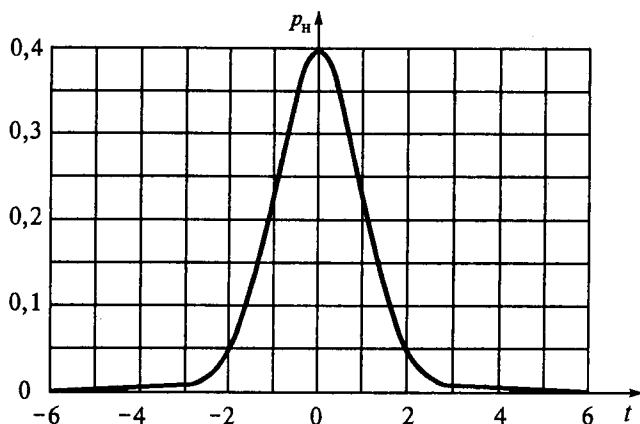


Рис. 2.5. График нормированного нормального закона распределения $p_n(t)$

Отметим связь границ Δ_r и z в выражениях (2.11) и (2.12) при одинаковых значениях вероятности P . Пусть задан некоторый симметричный интервал распределения погрешности $(-t_r, t_r)$, где $t_r = z = \Delta_r/\sigma$ — относительная его граница. При нормированном нормальном законе распределения $p_n(t)$ (2.14) вероятность $P(-t_r < t < t_r)$ попадания относительной случайной величины t в интервал $(-t_r, t_r)$ равна вероятности $P(-\Delta_r < \Delta < \Delta_r)$ при законе распределения вида (2.10) для границы $\Delta_r = t_r \sigma = z \sigma$.

Нормальный закон распределения случайных погрешностей широко используется при обработке результатов измерений, что объясняется следующими обстоятельствами. Случайная погрешность измерения некоторой ве-

личины складывается из многих составляющих, вызванных различными причинами, зачастую трудноуловимыми. Причем каждая из составляющих оказывает незначительное влияние на случайную погрешность. При этом, как следует из центральной предельной теоремы теории вероятностей (теоремы Ляпунова), такая случайная погрешность имеет закон распределения, близкий к нормальному. Учитывая изложенное, оправданно принимают, что при прямых измерениях закон распределения случайных погрешностей многократных наблюдений некоторой величины соответствует нормальному. Для получения достаточно точных результатов обработки таких наблюдений их число n должно быть не меньше 20.

Закон распределения Стьюдента (Р.А. Фишер назвал его распределением *Стьюдента* — псевдоним В.С. Госсета, предсказавшего это распределение) наиболее часто применяется в процессе обработки результатов небольшого числа ($2 \leq n < 20$) многократных наблюдений физической величины и справедлив, когда случайные погрешности распределены по нормальному закону. Закон описывает распределение плотности вероятности значений случайной величины $t_x = \Delta_x / \tilde{\sigma}_{cp} = (\tilde{x} - x_n) / \tilde{\sigma}_{cp}$. Здесь

$$\tilde{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$$

— оценка среднего арифметического значения ряда наблюдений ($x_1, x_2, \dots, x_n$) величины x_n ; $\tilde{\sigma}_{cp}$ — оценка СКО случайной величины $\tilde{x}$. Этот закон учитывает число выполненных наблюдений n и задается функцией:

$$p(t_x)|_n = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\sqrt{\pi(n-1)}} \left(1 + \frac{t_x^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}}. \quad (2.15)$$

Здесь $n \geq 2$ — число наблюдений; $\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)$, $\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)$ — гамма-функции (интегралы Эйлера), определяемые для некоторого аргумента x как

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du. \quad (2.16)$$

На рис. 2.6 приведены графики закона распределения Стьюдента (2.15) для различного числа наблюдений n . Для сравнения на этом же рисунке показан график нормированного нормального распределения $p_n(t)$, случайная относительная погрешность которого $t = \Delta/\sigma$ принята равной t_x .

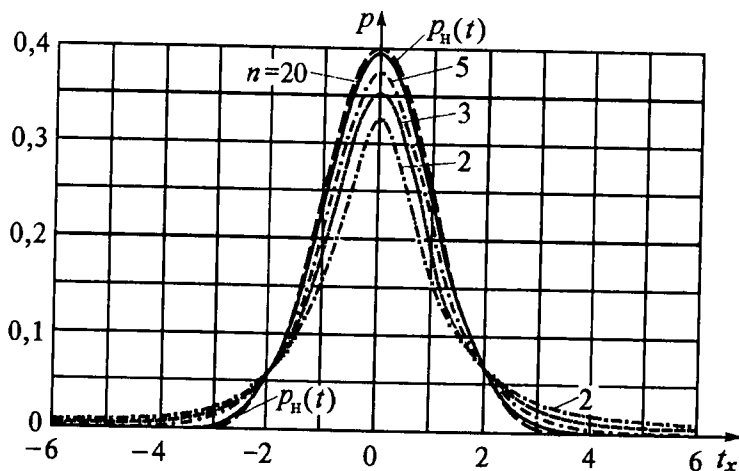


Рис. 2.6. Графики распределения Стьюдента $p(t_x)_n$ для различных n и нормированного нормального распределения $p_n(t)$ при $t = t_x$

Из анализа графиков следует, что закон распределения Стьюдента при числе наблюдений $n > 20$ практически совпадает с нормальным нормированным законом $p_n(t)$, а при $n \leq 20$ отличается от него тем значительнее, чем меньше n . Отличия состоят в увеличении рассеяния относительных погрешностей t_x относительно центра $t_x = 0$ по мере уменьшения числа наблюдений. При этом следует ожидать уменьшения вероятности P попадания погрешностей случайной величины t_x в заданный интервал $(-t_r, t_r)$.

Для поиска такой вероятности достаточно подставить (2.15) в формулу, подобную (2.7), но в которой переменная Δ заменена на относительную $t_x = (\tilde{x} - x_n) / \tilde{\sigma}_{cp}$, а пределы интеграла Δ_{r1} и Δ_{r2} — на равные $\pm t_r = \pm \Delta_r / \tilde{\sigma}_{cp}$:

$$P(-t_r < t_x < t_r)_n = \int_{-t_r}^{t_r} p(t_x)_n dt_x = 2 \int_0^{t_r} p(t_x)_n dt_x. \quad (2.17)$$

Результаты расчета значений вероятности по формуле (2.17) приведены в виде графиков для нескольких значений n на рис. 2.7. Там же для сравнения дан график интеграла вероятностей $\Psi(z)$, у которого аргумент z принят равным t_r . Из рисунка видно, что при большом числе измерений ($n > 20$) вероятность (2.17) практически совпадает с вероятностью, даваемой интегралом

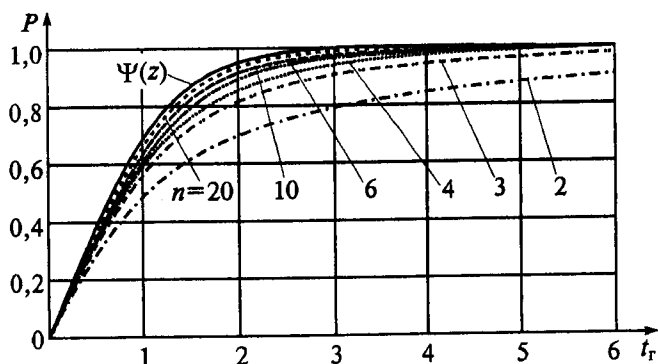


Рис. 2.7. Графики вероятностей $P(-t_r < t < t_r)_n$ при законе распределения Стьюдента для различных значений n и функции $\Psi(z)$

$\Psi(z)$. Однако, по мере снижения n , эта вероятность уменьшается и тем значительнее, чем меньше n .

Отметим, что параметр t_r на рис.2.7 и в выражении (2.17) называется коэффициентом Стьюдента и для него принято специальное обозначение. При выполнении расчетов погрешностей измерений задаются некоторой доверительной вероятностью $P_d = P$ и числом наблюдений n . Поэтому данный коэффициент обозначают через $t(P_d, n)$. Значения этого коэффициента приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Коэффициенты Стьюдента $t(P_d, n)$

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

При использовании на практике коэффициентов Стьюдента задаются доверительной вероятностью $P_d > 0,9$.

Равномерный закон распределения плотности вероятности характерен для поведения случайных погрешностей при измерении непрерывных физических величин методом дискретного счета (так называемые погрешности дискретизации) при преобразовании таких величин в аналого-цифровых преобразователях (погрешности квантования уровней сигналов), а также для погрешностей отсчета показаний с различных шкал измерительных приборов.

Все возможные случайные погрешности результатов измерений, характеризующихся равномерным законом, расположены в некотором интервале $(-\Delta_m, \Delta_m)$, где Δ_m — максимальная погрешность. Аналитически плотность вероятности равномерного закона распределения погрешностей описывается соотношениями:

$$p(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta_m}, & -\Delta_m \leq \Delta \leq \Delta_m; \\ 0, & \Delta < -\Delta_m, \Delta > \Delta_m. \end{cases} \quad (2.18)$$

График равномерного закона распределения плотности вероятности приведен на рис. 2.8.

Вероятность того, что случайная погрешность результатов измерений Δ находится в симметричном интервале $(-\Delta_r, \Delta_r)$, определяется с помощью выражения (2.7) при подстановке в него значения плотности вероятности $p(\Delta) = 1/(2\Delta_m)$:

$$P(-\Delta_r < \Delta < \Delta_r) = \int_{-\Delta_r}^{\Delta_r} p(\Delta) d\Delta = \frac{1}{2\Delta_m} 2 \int_0^{\Delta_r} d\Delta = \frac{\Delta_r}{\Delta_m}. \quad (2.19)$$

На графике плотности вероятности (рис. 2.8) площадь заштрихованного прямоугольника с основанием $2\Delta_r$ и высотой $1/(2\Delta_m)$ численно равна вероятности, определяемой по формуле (2.19).

Для равномерного закона распределения погрешностей, симметричного относительно центра $\Delta = 0$, расчет СКО σ случайной погрешности выполняется по (2.9):

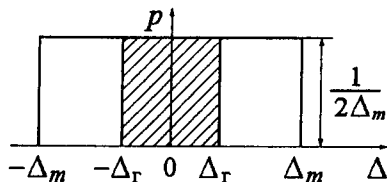


Рис. 2.8. Равномерный закон распределения

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 p(\Delta) d\Delta} = \sqrt{\frac{1}{2\Delta_m} \int_{-\Delta_m}^{\Delta_m} \Delta^2 d\Delta} = \sqrt{\frac{\Delta_m^2}{3}} = \frac{\Delta_m}{\sqrt{3}}. \quad (2.20)$$

Треугольный закон распределения (закон Симпсона) характерен для случайных погрешностей цифровых измерительных приборов, в которых измеряемая величина преобразуется в пропорциональный интервал времени $T_{сч}$, называемый *временем счета*. Измерение этого интервала выполняется с помощью счетных импульсов стабильного генератора, имеющих заданный период следования T_0 . В связи со случайным положением счетных импульсов относительно интервала $T_{сч}$, а также случайным соотношением между периодом T_0 и временем счета $T_{сч}$ треугольный закон представляет собой *композицию* (соединение) двух равномерных законов с одинаковыми максимальными погрешностями Δ_m .

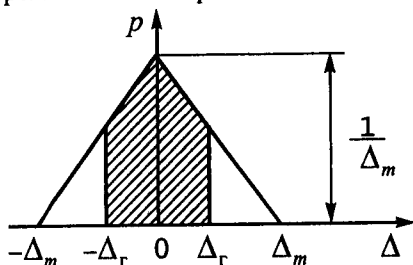


Рис. 2.9. Треугольный закон распределения

Для треугольного закона функция распределения плотности вероятности случайных погрешностей задается соотношениями:

$$p(\Delta) = \begin{cases} \frac{\Delta_m + \Delta}{\Delta_m^2}, & -\Delta_m \leq \Delta \leq 0; \\ \frac{\Delta_m - \Delta}{\Delta_m^2}, & 0 \leq \Delta \leq \Delta_m; \\ 0, & -\Delta_m > \Delta; \Delta > \Delta_m. \end{cases} \quad (2.21)$$

График треугольного закона распределения случайных погрешностей приведен на рис.2.9.

Для этого закона вероятность того, что погрешность измерения Δ располагается в интервале $(-\Delta_r, \Delta_r)$, находится с помощью формул (2.7) и (2.21):

$$P(-\Delta_r < \Delta < \Delta_r) = 2 \int_0^{\Delta_r} \frac{\Delta_m - \Delta}{\Delta_m^2} d\Delta = 2 \frac{\Delta_r}{\Delta_m} - \left(\frac{\Delta_r}{\Delta_m} \right)^2. \quad (2.22)$$

Заштрихованная область на рис. 2.9 численно равна вероятности (2.22). СКО σ несложно определить путем подстановки в (2.9) первого или второго выражения для $p(\Delta)$ из (2.22). В результате несложных вычислений получаем, что $\sigma = \Delta_m / \sqrt{6}$.

Как уже отмечалось, в практике радиоизмерений встречаются и другие законы распределения погрешностей (например, *трапецеидальный и арксинуса* и др.). Отметим в частности, что трапецеидальный закон является композицией двух нормальных с различными значениями максимальных погрешностей Δ_m . Если закон распределения неизвестен, то обычно принимают равномерное распределение погрешностей.

Описание и оценка результатов наблюдений

Ниже предполагается, что результаты наблюдений $x = x_n + \Delta$ некоторой физической величины x_n содержат только случайную погрешность $\Delta = \overset{\circ}{\Delta}$. Данные результаты, как и случайная погрешность Δ , являются случайной величиной.

Свойства случайной величины x наиболее полно описываются законом распределения $p(x)$, соответствующим закону распределения ее случайной погрешности Δ .

Примеры нормального и равномерного законов распределения $p(x)$ показаны на рис. 2.10, где m_1 — центр распределения случайной величины $x = x_n + \Delta$.

Аналитическое представление данных законов можно получить путем преобразования координат в формулах (2.10) и (2.18), т. е. переходом к новой переменной x . Например, нормальный закон распределения случайной величины x описывается выражением:

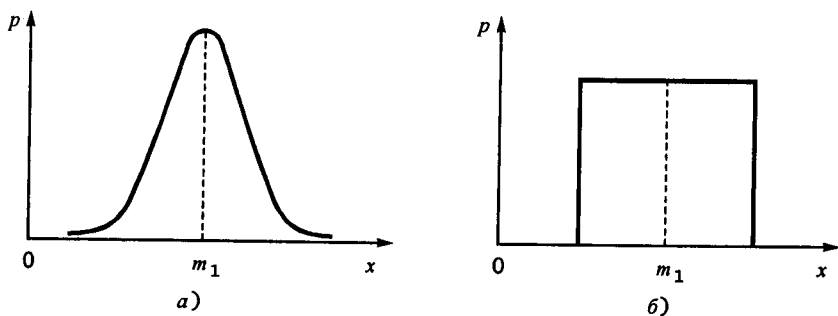


Рис. 2.10. Законы распределения случайной величины:
а — нормальный; б — равномерный

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m_1)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.23)$$

где m_1 и σ — соответственно математическое ожидание и СКО случайной величины.

Вероятность P попадания величины x в некоторый интервал (x_1, x_2) вычисляется по формуле, подобной (2.7):

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx. \quad (2.24)$$

Для описания отдельных свойств случайной величины x используются числовые характеристики законов распределения $p(x)$ — *начальные и центральные* моменты k -го порядка, представляющие собой некоторые средние значения. Моменты называются начальными, если с их помощью усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, и центральными, если усредняются величины, отсчитываемые от центра распределения.

Ниже приведены формулы расчета только тех моментов, которые наиболее часто используются при анализе законов распределения $p(x)$.

Начальный момент 1-го порядка (*математическое ожидание случайной величины*) определяет центр распределения $p(x)$ и описывается выражением:

$$m_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx. \quad (2.25)$$

Центральный момент 2-го порядка (*дисперсия случайной величины*) характеризует рассеяние значений случайной величины и вычисляется как:

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_1)^2 p(x) dx. \quad (2.26)$$

Точечные оценки законов распределения результатов наблюдений. Рассмотренные функции распределения $p(x)$ описывают поведение *непрерывных* случайных величин x , возможные значения которых неотделимы друг от друга и непрерывно заполняют некоторый конечный или бесконечный интервал. Поэтому выражения (2.25) и (2.26) относятся именно к непрерывным величинам. Однако реальное число n наблюдений физической величины x_n всегда ограничено, и поэтому как результаты наблюдений, так и их случайные погрешности допустимо считать величинами дискретными, возможные значения которых отделимы друг от друга и поддаются счету. В связи с этим рассмотрим важный вопрос оценки математического ожидания

m_1 и СКО $\sigma = \sqrt{D}$ для ограниченной группы (*выборки*) наблюдений, обозначая их через x_i . Такие оценки в метрологии называются *точечными* и их принято помечать волнистой чертой, т. е. обозначать через $\tilde{m}_1$, $\tilde{\sigma}$ и $\tilde{D}$. Сразу же отметим, что оценку $\tilde{m}_1$, обозначаемую в последующих разделах через $\tilde{x}$, принимают за *результат измерений* величины x_n .

Результат измерений $\tilde{x} = \tilde{m}_1$ при распределении наблюдений по *нормальному закону* определяют, учитывая известную в теории вероятностей закономерность (закон больших чисел): при *достаточно большом* числе n независимых наблюдений x_i среднее арифметическое полученных значений случайной величины приближается к ее математическому ожиданию m_1 :

$$m_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.27)$$

Соответственно, при поиске оценки СКО $\tilde{\sigma}$ используют выражение для СКО σ , справедливое для *достаточно больших* n :

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2}. \quad (2.28)$$

Иначе говоря, точечные оценки $\tilde{x} = \tilde{m}_1$ и $\tilde{\sigma}$ находят с помощью выражений (2.27) и (2.28) при конечном и относительно малом числе наблюдений n . Чем n больше, тем ближе эти оценки к величинам m_1 и σ .

Доверительная вероятность и доверительный интервал. Принимая точечную оценку $\tilde{x} = \tilde{m}_1$ за истинное значение измеряемой величины x_n , необходимо убедиться в ее точности. В качестве меры такой точности следует рассматривать симметричный интервал $(-\Delta_r, \Delta_r)$, в котором с заданной вероятностью $P_d = 1 - q$ располагается ошибка оценки $\Delta_x = \tilde{x} - x_n$: $P(-\Delta_r < \tilde{x} - x_n < \Delta_r) = P_d$.

Это выражение принято записывать в форме:

$$P(\tilde{x} - \Delta_r < x_n < \tilde{x} + \Delta_r) = P_d, \quad (2.29)$$

означающей, что истинное значение измеряемой величины с вероятностью P_d попадает в интервал $(\tilde{x} - \Delta_r, \tilde{x} + \Delta_r)$.

Интервал $(\tilde{x} - \Delta_r, \tilde{x} + \Delta_r)$ шириной $2\Delta_r$ и вероятность P_d называются *доверительными*, а коэффициент q , принимаемый не большим 0,1 — *уровнем значимости*. Отметим также, что $x_n = \tilde{x} - \Delta_r$ и $x_n = \tilde{x} + \Delta_r$ называются *нижней и верхней границами доверительного интервала*, а Δ_r — *доверительной границей случайной погрешности результата измерения*.

Порядок определения границы Δ_r приведен в гл. 3. Здесь же отметим, что эта граница зависит от доверительной вероятности P_d . Поэтому в результатах обработки многократных наблюдений величины x_n обязательно указывается принятое значение этой вероятности.

В метрологии оценка случайных погрешностей измерений с помощью доверительного интервала называется *интервальной*, а собственно доверительный интервал определяется главным образом с использованием *квантильных* оценок случайных погрешностей, поясняемых ниже.

Квантильные оценки распределения случайных погрешностей. Пояснение квантильных оценок дается с помощью рис. 2.11, на котором приведен график $p(\Delta)$ нормального закона распределения случайных погрешностей $\Delta = \dot{\Delta}$.

При таких оценках исходят из того, что площадь, заключенная под всей кривой плотности распределения погрешностей, отражает вероятность всех возможных значений погрешности и по условиям нормирования равна единице. Эту площадь можно разделить вертикальными линиями на части. Абсциссы таких линий называются *квантилями*.

Под P -процентным (здесь P — символ вероятности) *квантилем* Δ_P принято понимать абсциссу такой вертикальной линии, слева от которой площадь под кривой плотности распределения $p(\Delta)$ равна P %. Иначе говоря, *квантиль* — это значение случайной величины (в данном случае погрешности измерений) Δ с заданной доверительной вероятностью P_d .

На рис. 2.11 абсцисса $-\Delta_1$ есть 25 %-ная квантиль, так как площадь под кривой $p(\Delta)$ слева от нее, т.е. от $-\infty$ до $-\Delta_1$ составляет 25 % всей площади. Абсцисса Δ_1 соответствует 75 %-ной квантилю.

В интервале между квантилями $\Delta_{0,25}$ и $\Delta_{0,75}$ содержится 50% всех возможных значений случайной погрешности измерений Δ , и его протяженность записывается в таком виде: $d_{0,5} = \Delta_{0,75} - \Delta_{0,25}$. Интервал значений случайной погрешности Δ между $\Delta_{0,05}$ и $\Delta_{0,95}$ охватывает 90 % всех ее возможных значений и называется *интерквантильным промежутком* с 90 %-ной вероятностью. Протяженность интерквантильного промежутка определяется как: $d_{0,9} = \Delta_{0,95} - \Delta_{0,05}$.

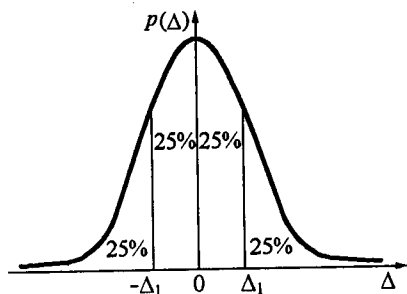


Рис. 2.11. Квантильные оценки случайной погрешности

2.5. Правила и формы представления результатов измерений

Любая измерительная информация — результаты и погрешности измерений, эмпирические зависимости и т. д. — должна сопровождаться показателями точности измерений. В целях единообразия отражения результатов и погрешностей измерений необходимо применять однотипные показатели точности измерений и формы представления результатов измерений.

Распространенной ошибкой при оценивании результатов и погрешностей измерений является вычисление их и запись с большим числом значащих цифр. Этому способствует использование для расчетов компьютеров, позволяющих получать результаты расчета с четырьмя и более значащими цифрами. Однако погрешности измерений не всегда требуется знать с очень высокой точностью. В частности, для технических измерений допустимой считается погрешность оценивания погрешности в 15...20 %. Например, вычислив значение погрешности 0,4359, а результата измерения — 12,7254, надо подумать, имеет ли смысл запись результата с такой погрешностью. Ведь если исходить из того, что недостоверность результата уже характеризуется десятками долями (0,4...), то вклад последующих значащих цифр в оцененную погрешность будет все менее и менее весом и ничего не добавит к информации об измеряемой величине. Поэтому то и необходимо ограничивать число значащих цифр в записи результата измерения.

Соответствующим стандартом установлено, что в численных показателях точности измерений (в том числе и в погрешности) должно быть не более двух значащих цифр. Так, при записи наименьшие разряды числовых значений результата измерения и численных показателей точности должны быть одинаковы. В приведенном примере оценка погрешности должна быть записана как 0,43 или 0,4, а результат измерения — 12,72 или 12,7 соответственно. Расчет погрешностей округления погрешности измерения показывает, что при округлении до двух значащих цифр она составляет не более 5 %, а при округлении до одной значащей цифры — не более 50 %. При этом характеристики погрешности оценивают приближенно; точность оценок согласовывается с целью измерения.

В практической метрологии выработаны следующие правила округления результатов и погрешностей измерений.

1. Результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

Пример 2.8. Результат 4,0800, погрешность 0,001; результат округляют до 4,080.

2. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остальные цифры числа не изменяются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.

Пример 2.9. Число 174437 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 174400, число 174,437 — до 174,4.

3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю сохраняемую цифру увеличивают на единицу.

Пример 2.10. При сохранении трех значащих цифр число 12567 округляют до 12600, число 125,67 до 126.

4. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная.

Пример 2.11. Число 232,5 при сохранении двух значащих цифр округляют до 232, а число 233,5 до 234.

5. Погрешность результата измерения указывается *двумя* значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и *одной* — если первая цифра равна 3 или более.

6. Округление производят лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Если руководствоваться этими правилами округления, то количество значащих цифр в числовом значении результата измерений дает возможность ориентировочно судить о точности измерения. Это связано с тем, что предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения.

2.6. Нормирование метрологических характеристик средств измерений

Для обеспечения единства измерений и взаимозаменяемости средств измерений их метрологические характеристики нормируются и регламентируются. Для этого используют *нормированные значения погрешности*. Под нормированным значением понимается погрешность, являющаяся *предельной* для данного типа средств измерения. Правила предписания пределов допускаемых погрешностей и форма их записи устанавливаются системой стандартов, обеспечивающей единство измерений.

К метрологическим характеристикам средств измерений относятся те, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений. Среди них можно выделить несколько основных:

- градуировочные характеристики, определяющие зависимость выходного сигнала от входного; номинальное значение меры; пределы измерения; цена деления шкалы для аналоговых приборов; вид и параметры цифрового кода цифровых приборов;

- динамические характеристики, отражающие инерционные свойства средств измерений и необходимые для оценивания динамических погрешностей измерений;

- инструментальные составляющие погрешности измерения;

- функции влияния, отражающие зависимость метрологических характеристик средств измерений от воздействия влияющих величин или неинформативных параметров (напряжение, частота сети и т. д.).

Метрологические характеристики нормируются для нормальных условий применения средств измерений. *Нормальными* считаются такие условия, при которых изменением метрологических характеристик под воздействием влияющих величин можно пренебречь.

Для многих типов средств измерений нормальными условиями применения являются: температура окружающей среды (20 ± 10)° С; напряжение питающей сети ($220 \pm 4,4$) В; частота сети ($50 \pm 0,5$) Гц. Одной из важнейших метрологических характеристик является *погрешность средств измерения* — *инструментальная погрешность* (точность) измерения ими физической величины.

Инструментальную погрешность в нормальной области значения влияющих величин *называют основной*.

Выход значения влияющей величины за пределы нормальной области значений может привести к возникновению значительной составляющей инструментальной погрешности, называемой *дополнительной*.

Для средств измерений электрических величин основная и дополнительная погрешности нормируются отдельно. Пределы допускаемых дополнительных погрешностей, как правило, устанавливают в виде долевого значения предела допускаемой основной погрешности. Для оценки дополнительных погрешностей измерений в документации на средство измерения обычно указывают нормы изменения показаний при выходе условий измерения за пределы нормальных.

Классы точности средств измерений

Учет всех нормируемых метрологических характеристик средства измерений при оценивании погрешности результата измерений — достаточно сложная и трудоемкая процедура, оправданная при измерениях повышенной точности. При измерениях на производстве, в повседневной жизни такая точность не всегда нужна. Однако определенная информация о возможной инструментальной составляющей погрешности измерения необходима и

поэтому она должна быть каким-либо образом отражена. Такая информация содержится в указании класса точности средства измерения.

В Рекомендации по межгосударственной стандартизации ПМГ 29–99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» (аналогично в ГОСТе) дается следующее определение класса точности: «Класс точности средства измерения — обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливают в стандартах на отдельные виды средств измерений». Имеется и такое примечание: «Класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполненных с помощью этих средств». Последнее связано с тем, что погрешность зависит еще от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т.д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность средства измерения данного типа.

Классы точности присваивают средствам измерений при их разработке на основании исследований и испытаний представительной партии устройств данного типа. Обычно они устанавливаются в стандартах или технических условиях на средства измерений. При этом пределы допускаемых погрешностей нормируют и выражают в форме *абсолютной* ($\Delta_{\text{си}} = \Delta$), *относительной* ($\delta_{\text{си}} = \delta$) или *приведенной* ($\gamma_{\text{си}} = \gamma$) *погрешностей* (далее индекс «си» для упрощения опущен). Форма выражения зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и конкретного назначения средства измерения.

Пределы допускаемых погрешностей определяются аналогично погрешностям измерений соответственно по формулам (2.1), (2.2) и (2.3). Однако в них вместо результата измерения x должно использоваться показание средства измерения (измерительного прибора) y . В учебной и технической литературе это показание обозначают иногда в виде A , A_n , A_x , x_n или $x_{\text{изм}}$.

В общем случае абсолютная погрешность средств измерений $\Delta_{\text{си}} = \Delta$ состоит из *аддитивной* (суммируемой с измеряемой величиной) и *мультипликативной* (умножаемой на измеряемую величину) составляющих. Причиной возникновения аддитивной составляющей погрешности могут быть: неточность установки на нуль перед измерением, наличие термоЭДС в цепях постоянного тока и т.д. Для устранения таких погрешностей во многих измерительных приборах предусмотрено механическое или электронное устройство для установки нуля шкалы или цифрового индикатора (корректор нуля). Причиной возникновения мультипликативной погрешности могут быть изменения коэффициента усиления усилителя, коэффициента передачи измерительного преобразователя и т.д.

Пределы допускаемой основной погрешности средства измерения

Максимальная основная погрешность измерительного прибора (средства измерения), при которой он разрешен к применению, называется *пределом допускаемой основной погрешности*.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливают по одной из формул:

$$\Delta = \pm a, \quad (2.30)$$

или

$$\Delta = \pm (a + bx), \quad (2.31)$$

где x — значение измеряемой величины; a, b — положительные числа, не зависящие от x .

Первая формула описывает аддитивную погрешность (рис. 2.12, а) средств измерений. Нормирование в соответствии с выражением (2.31) означает, что в составе погрешности средства измерения присутствует сумма аддитивной и мультипликативной (мультипликативная погрешность показана на рис. 2.12, б) составляющих (рис. 2.12, в). Например, для генератора низкой частоты ГЗ-36: $\Delta = \pm (0,03 f + 2)$ Гц.

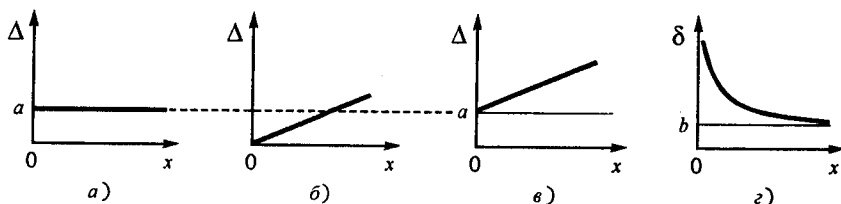


Рис. 2.12. Виды погрешностей средств измерений:

a — аддитивная; b — мультипликативная;

v — сумма аддитивной и мультипликативной; z — относительная суммарная

При проведении измерений важное значение имеет *диапазон измерений* средства измерения (измерительного прибора), что хорошо видно на графике относительной суммарной погрешности δ (см. рис. 2.12, з). При уменьшении измеряемой величины x относительная погрешность средства измерения δ увеличивается и изменяется по гиперболе. Поэтому *следует выбирать такой диапазон измерений, в котором значение x близко к X_k — большему (по модулю) из пределов измерений*.

Отметим, что рассмотренные выше выражения и графики для абсолютной Δ и относительной δ погрешностей средства измерения получены для $\Delta > 0$. Однако в практике измерений вполне возможно получение значения $\Delta < 0$. Поэтому в общем случае выражения для абсолютной и относительной погрешностей средства измерения аналитически записываются со знаком « $\pm$ ».

В формулах (2.30) и (2.31) значения Δ и x выражаются одновременно либо в единицах измеряемой или воспроизводимой мерой величины, либо в делениях шкалы средства измерения. В этих случаях класс точности обозначается заглавными буквами латинского алфавита (например, L, M, C и т. д.), или римскими цифрами (I, II, III и т. д.), к буквам при этом допускается присоединять индексы в виде арабской цифры. Чем меньше пределы допускаемой погрешности, тем ближе к началу алфавита должна быть буква и тем меньше цифра.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности устанавливают по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100 \% = \pm p. \quad (2.32)$$

Здесь X_N — нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и абсолютная погрешность Δ ; p — отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда предпочтительных чисел:

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

где $n = 1, 0, -1, -2$ и т.д.

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

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

Пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают следующим образом:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100 \% = \pm q, \quad (2.34)$$

если погрешность задана формулой (2.30), т.е. $\Delta = \pm a$. Здесь q — отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда предпочтительных чисел (2.33).

Когда допускаемая абсолютная основная погрешность задана формулой (2.31), *пределы допускаемой относительной основной погрешности:*

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100 \% = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \quad (2.35)$$

где c — суммарная относительная погрешность прибора; d — аддитивная относительная погрешность прибора; X_k — конечное значение диапазона измерений; c, d — отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда предпочтительных чисел, приведенных в (2.33).

Числа a, b, c, d в (2.31) и (2.35) связаны между собой следующим образом:

$$c = b + d; \quad d = \frac{a}{|X_k|}, \quad (2.36)$$

причем всегда $c > d$.

Классы точности измерительных приборов, пределы допускаемой относительной основной погрешности которых принято выражать в виде долевого значения предела допускаемой основной погрешности, т.е. по формуле (2.35), обозначают числами c и d (в процентах), разделяя их косой чертой (например, 0,05/0,02).

Пределы допускаемой дополнительной погрешности средства измерения

Предел допускаемой абсолютной дополнительной погрешности средства измерения $\Delta_{\text{дси}}$ может указываться в виде:

- постоянного значения для всей рабочей области влияющей величины или постоянных значений по интервалам рабочей области влияющей величины;
- отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующего регламентированному интервалу влияющей величины, к этому интервалу;
- зависимости предела $\Delta_{\text{дси}}$ от влияющей величины.

Правила и примеры обозначения классов точности СИ даны в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Примеры обозначения классов точности

Формула выражения основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Обозначение класса точности	
		в документации	на приборе
Абсолютная $\Delta = \pm a;$ $\Delta = \pm (a + bx)$	$\pm a;$ $\pm (a + bx)$	L M	L M
Приведенная $\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100\% = \pm p$	$\gamma = \pm 1,5$	1,5	1,5
Относительная $\delta = \frac{\Delta}{x} 100\% = \pm q$	$\delta = \pm 0,5$	0,5	0,5
Относительная $\delta = \pm \left[c + d \left(\left \frac{X_k}{x} \right - 1 \right) \right]$	$\delta = \pm 0,02 / 0,01$	$c/d = 0,02 / 0,01$	0,02 / 0,01

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

Пример 2.12. Класс точности прибора указан буквой p . Тогда абсолютная погрешность результата измерения $\Delta = \pm pU_N/100$, а относительная погрешность измерения (в процентах): $\delta = \Delta_{\text{оп}}/u = pU_N/u$. Пусть класс точности используемого вольтметра 1,0. Проводилось измерение напряжения в точке $u = 1$ В на пределе измерения $U_N = 10$ В. Тогда относительная погрешность результата измерения:

$$\delta = \pm pU_N/u = \pm 1,0 \cdot 10/1 = \pm 10 \, \%.$$

Пример 2.13. Отсчетное устройство вольтметра среднего квадратического значения с классом точности 0,5 имеет пределы 0 и 200 В. Указатель показывает напряжение 127 В. Чему равно измеряемое напряжение?

Решение. Для данного прибора предел допускаемой приведенной основной погрешности $\gamma = \frac{\Delta}{U_N} 100 \, \% = \frac{\Delta}{200} 100 \, \%$ не превышает 0,5. Отсюда находим, что $\Delta < \pm 1$ В. Следовательно, измеряемое напряжение: $U = (127 \pm 1)$ В.

Пример 2.14. Отсчетное устройство амперметра с пределами ± 50 мА и классом точности 0,04/0,02 показывает $i = 25$ мА. Чему равна измеряемая сила тока?

Решение. Для данного прибора предел допускаемой относительной погрешности в процентах согласно (2.35):

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{I_K}{i} \right| - 1 \right) \right] = \pm \left[0,04 + 0,02 \left(\left| \frac{50}{25} \right| - 1 \right) \right] = \pm 0,06 \, \%.$$

Абсолютная погрешность измерения определится как

$$\Delta = \pm \delta \cdot i / 100 = 0,06 \cdot 25 / 100 = \pm 0,015 \approx \pm 0,02 \, \text{мА}.$$

Таким образом, измеряемая сила тока $I = (25 \pm 0,02)$ мА.

Пример 2.15. Класс точности используемого при измерениях вольтметра указан как $c/d = 0,06 / 0,04$. Определить абсолютную погрешность измерения.

Решение. В этом случае удобнее вычислить относительную погрешность результата измерения по формуле (2.35), а уже затем найти абсолютную погрешность как $\Delta = \delta u / 100$. Проводилось измерение напряжения в точке $u = 25$ В на пределе измерения $U_K = 100$ В. Тогда относительная погрешность результата измерения:

$$\delta = \pm \left[0,06 + 0,04 \left(\left| \frac{100}{25} \right| - 1 \right) \right] = \pm 0,18 \, \%,$$

а абсолютная погрешность измерения напряжения:

$$\Delta = \pm \delta \cdot u / 100 = \pm 0,18 \cdot 25 / 100 \approx \pm 0,05 \text{ В.}$$

Пример 2.16. Выбрать вольтметр среднего квадратического значения для измерения сетевого переменного напряжения 220 В с относительной погрешностью, не превышающей 2 %. Записать результат измерений, если прибор показал 225 В.

Решение. Выбираем вольтметр с пределами шкалы 0...300 В. Так как относительная погрешность измерений δ не должна быть больше 2 %, необходимо, чтобы абсолютная погрешность не превысила $\Delta = \delta u = 0,02 \cdot 220 \text{ В} = 4,4 \text{ В}$. Тогда приведенная погрешность измерений напряжения составит:

$$\gamma = \frac{\Delta}{U_N} 100\% = (4,4/300)100\% = 1,47 \%,$$

что соответствует классу точности 1,5. Результат измерений: $U = (225 \pm 4,4) \text{ В}$.

Отметим специфические свойства точности цифровых средств измерений. В частности, в цифровых измерительных приборах аддитивная погрешность определяется *погрешностью квантования* (погрешностью дискретности). При плавном изменении входной величины x (например, напряжения в диапазоне 0...5 мВ) цифровой вольтметр с пределом измерения 100 мВ не может дать других показаний, кроме дискретных значений 0–1–2–3–4–5 мВ. Поэтому при возрастании величины x от 0 до 0,5 мВ прибор будет показывать $x = 0$. При превышении значения 0,5 мВ цифровой вольтметр даст показания $x = 1 \text{ мВ}$ и сохранит его до $x = 1,5 \text{ мВ}$ и т. д.

2.7. Информационные характеристики средств измерений

Так как все измерительные приборы, средства и системы предназначены для получения измерительной информации, кратко проанализируем их информационные характеристики. Это связано также с тем, что сейчас наблюдается внедрение методов теории информации в процессы получения измерительных данных.

С точки зрения теории информации суть измерения состоит в сужении интервала неопределенности меры информации от значения, известного перед его проведением, до величины, называемой *энтропийным интервалом неопределенности* Δ . Чтобы оценить этот интервал, рассмотрим некоторые элементы теории информации. Одним из основных понятий теории информации является так называемая *безусловная энтропия* $H(x)$, которая для плотности вероятности распределения погрешностей $p(x)$ определяется как:

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) [\ln p(x)] dx. \quad (2.37)$$

Безусловная энтропия характеризует неопределенность наших знаний (сведений), остающуюся после получения (после измерений) значения измеряемой величины при свойственном ей законе распределения вероятностей.

Поскольку все средства измерения предназначены для получения измерительной информации, необходимо особо остановиться на их информационных характеристиках.

Согласно основному положению теории информации (теорема теории информации сформулирована К. Шенноном), получаемое в результате измерения количество информации I равно уменьшению неопределенности, т.е. разности энтропий до и после измерения:

$$I = H(x) - H\left(\frac{x}{x_{\text{и}}}\right). \quad (2.38)$$

Здесь $H(x)$ — безусловная (априорная) энтропия; $H\left(\frac{x}{x_{\text{и}}}\right)$ — условная (апостериорная) энтропия, т.е. энтропия величины x при условии, что получен результат измерений $x_{\text{и}}$. Очевидно, что условная энтропия определяется законом распределения погрешности Δ средства измерения:

$$H\left(\frac{x}{x_{\text{и}}}\right) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(\Delta) [\ln p(\Delta)] d\Delta. \quad (2.39)$$

Если погрешность измерения распределена равномерно на некотором интервале $[-\Delta_m \dots \Delta_m]$, то условная энтропия:

$$H\left(\frac{x}{x_{\text{и}}}\right) = - \int_{-\Delta_m}^{\Delta_m} \frac{1}{2\Delta_m} \left(\ln \frac{1}{2\Delta_m} \right) d\Delta = \ln(2\Delta_m). \quad (2.40)$$

Для нормального закона распределения погрешности с СКО σ условная энтропия

$$H\left(\frac{x}{x_{\text{и}}}\right) = - \int_{-\Delta_m}^{\Delta_m} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-\Delta^2}{2\sigma^2} \ln \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-\Delta^2}{2\sigma^2} \right) d\Delta.$$

Опустив достаточно сложные выкладки, приведенные в специальной литературе, окончательно запишем:

$$H\left(\frac{x}{x_{\text{и}}}\right) = \ln(\sigma\sqrt{2\pi e}), \quad (2.41)$$

где e — основание натурального логарифма.

Из сравнения формул (2.40) и (2.41) нетрудно заметить, что измерительные приборы, имеющие различные законы распределения погрешностей, при измерении одной и той же величины могут давать одинаковое количество

информации. Для рассматриваемого случая это условие выполняется при $2\Delta_m = \sigma\sqrt{2\pi e}$. Поэтому в качестве характеристики дезинформационного воздействия на точность измерения погрешности с произвольным законом распределения, используют ее энтропийное значение.

В метрологии *энтропийным значением* погрешности измерения принято считать наибольшее значение погрешности при равномерном законе распределения, которая вносит такое же дезинформационное действие, как и погрешность с любым другим законом распределения. Так, например, если погрешность измерений распределена нормально, то энтропийное значение погрешности

$$\Delta_3 = 0,5\sigma\sqrt{2\pi e} = \sigma\sqrt{2\pi e} \approx 2,07\sigma. \quad (2.42)$$

Подобным образом определяется энтропийное значение погрешности для любого конкретного закона распределения.

В общем виде зависимость между энтропийным значением и значением СКО погрешности может быть представлена как:

$$\Delta_3 = k_3\sigma, \quad (2.43)$$

где k_3 — энтропийный коэффициент.

Энтропийный коэффициент k_3 зависит от вида закона распределения погрешностей. Для равномерного распределения энтропийный коэффициент

$$k_p = \frac{\Delta_3}{\sigma} = \sqrt{3} \approx 1,73, \quad (2.44)$$

а для нормального распределения

$$k_n = \sqrt{0,5\pi e} \approx 2,07. \quad (2.45)$$

Из теории погрешностей известно, что при одинаковых средних квадратических значениях погрешности дезинформационное действие погрешности с любым законом распределения меньше дезинформационного действия погрешности, распределенной по нормальному закону.

Для доказательства этого положения сравним два прибора, предназначенных для измерения одной и той же физической величины, но имеющих разные законы распределения погрешности. Пусть абсолютная погрешность первого измерительного прибора имеет равномерное распределение на интервале $(-10^{-2}, 10^{-2})$, а погрешность второго прибора — нормальное с нулевым математическим ожиданием и СКО $\sigma_2 = 0,5 \cdot 10^{-2}$. Сравним эти приборы по точности, выбрав в качестве критерия такие параметры, как: наибольшую погрешность, СКО погрешности и энтропийную погрешность.

Первый прибор имеет наибольшее значение абсолютной погрешности измерений $\Delta_1 = 10^{-2}$. Погрешность второго прибора не ограничена, ее наибольшее значение в принципе равно бесконечности. На практике для нормального закона часто используют значение «трех сигм», принимая абсолютную погрешность $\Delta = 3\sigma$. В данном примере $\Delta_2 = 3\sigma_2 = 1,5 \cdot 10^{-2}$. По этому критерию следует отдать предпочтение первому прибору, однако нельзя считать достаточно обоснованным принятое значение наибольшей погрешности второго прибора. СКО погрешности первого прибора $\sigma_1 = 10^{-2}/\sqrt{3} = 0,58 \cdot 10^{-2}$, следовательно, по этому критерию предпочтительнее второй прибор — у него СКО $\sigma_2 = 0,5 \cdot 10^{-2}$.

При информационном подходе к измерениям используют сравнение приборов по количеству информации, получаемой при измерении, т.е. по энтропийному значению погрешности. Для первого прибора согласно соотношению (2.43) энтропийное значение погрешности $\Delta_{31} = k_3 \sigma = 1,73 \cdot 10^{-2}$, а для второго по формуле (2.45) имеем $\Delta_{32} = k_n \sigma = 2,07 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 1,035 \cdot 10^{-2}$. Анализ полученных энтропийных значений погрешностей показывает, что по информационному критерию эти приборы отличаются существенно.

В области радиоизмерений можно считать энтропийную погрешность более точной и отвечающей современному информационному подходу к характеристике процесса измерения физических величин. Информационный подход позволяет с единых позиций анализировать измерительные устройства как в статическом, так и в динамическом режимах работы, оптимизировать технические характеристики и оценить предельные возможности тех или иных средств измерений.

Однако классические методы оценки погрешности измерений тоже имеют свои преимущества и по-прежнему в основном применяются в метрологии.

Контрольные вопросы

1. Перечислите возможные причины проявления погрешностей измерений.
2. Назовите признаки, по которым классифицируют погрешности.
3. Что принято называть абсолютной, относительной и приведенной погрешностями?
4. Что такое грубые погрешности (промахи)?
5. Какие характеристики погрешностей вам известны?
6. Сформулируйте свойства систематической, случайной и прогрессирующей составляющих погрешности измерений.
7. Приведите известные вам примеры методических погрешностей.
8. В чем заключаются принципы оценивания погрешностей?
9. Какие используют методы исключения или уменьшения систематических погрешностей?

10. При каких условиях погрешность измерения может рассматриваться как случайная величина?
11. Какой математический аппарат используется для оценки случайных погрешностей?
12. Назовите основные законы распределений случайных погрешностей.
13. Что такое нормальное распределение? Укажите основные характеристики нормального закона распределения.
14. Перечислите свойства интегральной и дифференциальной функций распределения случайной величины.
15. Назовите числовые параметры законов распределения.
16. Что такое интеграл вероятностей и для чего он используется?
17. Как описывается и когда используется распределение Стьюдента?
18. Что называется доверительной вероятностью и доверительным интервалом?
19. Какие способы задания доверительного интервала вам известны?
20. Перечислите правила округления результатов измерений.
21. Каким образом ориентировочно оценить погрешность результата измерения по числу его значащих цифр?
22. Перечислите основные принципы, лежащие в основе выбора нормируемых метрологических характеристик средств измерений.
23. На какие группы делятся нормируемые метрологические характеристики средств измерений?
24. Как выглядят графики абсолютной и относительной мультипликативной погрешности в зависимости от уровня измеряемой величины?
25. Как нормируются приборы по классам точности при преобладающей аддитивной погрешности?
26. Какие метрологические характеристики относятся к характеристикам, предназначенным для определения результатов измерений?
27. Какие метрологические характеристики описывают погрешность средств измерений? Каким образом производится их нормирование?
28. Какие информационные характеристики можно приписать измеряемой физической величине?
29. Как определяется энтропийное значение погрешности?
30. От чего зависит энтропийный коэффициент погрешности?

Глава 3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Главной задачей любых измерений является извлечение с заданной точностью и достоверностью количественной информации о физических величинах, тех или иных свойствах реальных физических объектов, закономерностях протекающих процессов и т. д. Поскольку измерения практически всегда сопровождаются появлением случайных погрешностей, то обработка результатов измерений должна включать в себя операции над случайными процессами или случайными величинами. Эти операции выполняются с помощью методов теории вероятности и математической статистики. Статистическая обработка результатов измерений — обработка измерительной информации с целью получения достоверных данных. Разнообразие задач, решаемых с помощью измерений, определяет и разнообразие видов статистической обработки их результатов.

3.1. Общие сведения

Приведенные в гл. 2 основные положения теории погрешностей позволяют рассмотреть ряд известных в метрологии алгоритмов статистической обработки результатов измерений.

Задача статистической обработки результатов многократных измерений заключается в нахождении оценки измеряемой величины и доверительного интервала, в котором находится ее истинное значение. Перед проведением обработки результатов измерений необходимо удостовериться в том, что данные из обрабатываемой выборки измерений статистически контролируются, группируются вокруг одного и того же центра и имеют одинаковую дисперсию.

Статистическая обработка используется для повышения точности измерений с многократными наблюдениями, а также определения статистических характеристик случайной погрешности. Вместе с тем из результатов измерений нельзя полностью исключить и систематические погрешности измерений. И поскольку всегда остаются их неисключенные остатки — *неисключенные систематические погрешности* (НСП), то с точки зрения уменьшения этих составляющих, статистическая обработка результатов измерений также необходима.

Для прямых однократных измерений статистическая обработка менее сложна и громоздка, что значительно упрощает оценку погрешностей. В производственных условиях точность таких измерений обычно оказывается вполне приемлемой. Вместе с тем практически всегда необходимо провести оценку их результатов.

Если в результатах наблюдений одно или два существенно отличаются от остальных, а наличия ошибки в снятии показаний, описки и других промахов не обнаружено, то необходимо проверить, не являются ли они грубыми погрешностями, подлежащими исключению.

В технических исследованиях часто используют косвенные измерения. Статистическую обработку результатов косвенных измерений производят, как правило, методами, основанными на раздельной обработке аргументов и их погрешностей и методом линеаризации.

Совместные и совокупные измерения характеризуются тем, что значения некоторых величин рассчитывают по системе уравнений, связывающих их с некоторыми другими величинами, определяемыми посредством прямых или косвенных измерений. При этом измеряются несколько комбинаций значений указанных величин. Наиболее распространенные совместные измерения обрабатываются разными статистическими методами. Среди них широко известен и часто применяется метод наименьших квадратов.

3.2. Прямые измерения с многократными наблюдениями

Необходимость в многократных наблюдениях некоторой физической величины $x_n = A$ возникает при наличии в процессе измерений значительных случайных погрешностей. При этом задача обработки состоит в том, чтобы по результатам наблюдений определить наилучшую (оптимальную) оценку измеряемой величины $x_n = A$ и интервал, в котором она находится с заданной вероятностью. Данная задача решается способом статистической обработки результатов наблюдений, основанным на гипотезе о распределении случайных погрешностей результатов по нормальному закону.

Порядок такой обработки должен проводиться в соответствии с государственным стандартом и рекомендациями по метрологии, характеризующими прямые измерения с многократными наблюдениями и методы обработки их результатов.

Учитывая указанный порядок, приводимая ниже методика обработки результатов измерений, дополнена необходимыми пояснениями и дается применительно к *прямым измерениям с многократными независимыми и равноточными наблюдениями*. Напомним, что равноточными называются измерения, проводимые одним экспериментатором в одинаковых условиях и с помощью одного и того же средства измерения.

Исключение систематических погрешностей из результатов наблюдений. Качество, а значит и точность результата многократных наблюдений тем выше, чем меньше систематическая составляющая погрешностей таких наблюдений. Поэтому весьма важно выявить систематические погрешности и исключить их из результатов наблюдений. К числу мер такого исключения относятся:

- устранение источников погрешностей до начала измерений, так как в большинстве областей измерений известны основные источники систематических погрешностей и разработаны методы, исключающие их возникновения или устраняющие их влияние на результат измерения; в связи с этим в практике измерений стараются устранить систематические погрешности не путем обработки экспериментальных данных, а применением приборов, реализующих соответствующие, оптимальные методы измерений;

- определение поправок и внесение их в результат измерения;
- оценка границ неисключенных систематических погрешностей.

Порядок учета неисключенных систематических погрешностей при оценке погрешности результатов прямых измерений с многократными наблюдениями рассмотрен в последующих разделах.

Оценка результата измерения и его среднего квадратического отклонения

Для удобства анализа предположим, что при выполнении n многократных наблюдений одной и той же величины $x_n = A$ постоянная систематическая погрешность Δ_c полностью исключена (равна нулю). Тогда результат i -го наблюдения $x_i = x_n + \Delta_i$ находится с некоторой абсолютной случайной погрешностью, которую можно записать в виде: $\Delta_i = \dot{\Delta}_i = x_i - x_n$.

При нормальном законе распределения случайной погрешности Δ_i за истинную величину $x_n = A$ принимают ее оптимальную оценку $\tilde{x} = \tilde{A}$, равную оценке $\tilde{m}_1$ математического ожидания выполненного ряда наблюдений, т. е. полагают, что $\tilde{x} = \tilde{A} = \tilde{m}_1$ есть *результат измерения*:

$$\tilde{x} = \tilde{A} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.1)$$

Зная оценку $\tilde{x} = \tilde{A} = \tilde{m}_1$ истинного значения величины x_n , вычисляют абсолютную погрешность каждого из n наблюдений:

$$\Delta_i = x_i - \tilde{x}. \quad (3.2)$$

Далее, воспользовавшись формулой (2.28), находят *оценку СКО наблюдений* $\tilde{\sigma}$, характеризующую точность метода измерений:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}. \quad (3.3)$$

Оценка $\tilde{x} = \tilde{A}$ измеряемого истинного значения $x_n = A_n$ зависит от числа наблюдений n и является случайной величиной. Поэтому вводят и вычисляют оценку СКО величины $\tilde{x} = \tilde{A}$, которую называют *оценкой среднего квадратического отклонения результата измерения* $\tilde{\sigma}_{\text{ср}} = S(\tilde{A})$. Данное СКО характеризует степень разброса значений $\tilde{x} = \tilde{A}$ по отношению к истинному значению $x_n = A_n$ и для различных n определяется как:

$$\tilde{\sigma}_{\text{ср}} = S(\tilde{A}) = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (3.4)$$

Из выражений (3.3) и (3.4) следует, что точность метода и точность результата многократных наблюдений увеличиваются с ростом числа n .

Рассмотрим случай многократных наблюдений, когда результат i -го наблюдения содержит и случайную $\dot{\Delta}_i$ и постоянную систематическую Δ_c погрешности: $x_i = x_n + \dot{\Delta}_i + \Delta_c$. Подстановка значений x_i в формулу (3.1) позволяет получить оценку $\tilde{x}$ результата измерений в следующем виде:

$$\tilde{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = x_n + \Delta_c + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{\Delta}_i. \quad (3.5)$$

Из этого выражения следует, что многократные наблюдения и увеличение их числа n не влияют на систематическую составляющую погрешности результата измерений, но уменьшают случайную (за счет разных знаков отдельных реализаций $\dot{\Delta}_i$). Поэтому в случае, когда в результате многократных наблюдений преобладает систематическая погрешность (например, при использовании прибора низкой точности), целесообразно ограничиться только одним измерением. Существенный для практики измерений вопрос ограничения числа многократных наблюдений рассмотрен ниже.

Обнаружение и исключение грубых погрешностей из результатов наблюдений

Если в полученной группе результатов наблюдений одно или два существенно отличаются от остальных, а наличия ошибки в снятии показаний, описки и других промахов не обнаружено, то необходимо проверить, не являются

ся ли они грубыми погрешностями, подлежащими исключению. Решение этой задачи выполняется общими методами проверки статистических гипотез в предположении нормального распределения результатов наблюдений. Проверяемая гипотеза состоит в утверждении, что результат i -го наблюдения x_i , не содержит грубой погрешности, т.е. является одним из значений измеряемой величины. Пользуясь определенными статистическими критериями, пытаются опровергнуть выдвинутую гипотезу. Если это удастся, то результат наблюдения рассматривают как грубую погрешность и его исключают.

Рассмотрим методику использования одного из критериев, рекомендуемого государственным стандартом.

Критерий оценки аномальности результатов наблюдений при неизвестном СКО $\tilde{\sigma}$. При исключении по этому критерию грубых погрешностей из результатов наблюдений проводят следующие операции.

1. Результаты группы из n наблюдений, называемые *объемом выборки*, упорядочивают по возрастанию $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$. По формулам (3.1) и (3.3) вычисляют оценки среднего арифметического значения $\tilde{x}$ и СКО наблюдений $\tilde{\sigma}$ этой выборки. Для предполагаемых промахов, которыми могут быть, например, результаты x_1 и x_n , проводят расчет коэффициентов:

$$t_1 = \frac{|x_1 - \tilde{x}|}{\tilde{\sigma}}, \quad t_n = \frac{|x_n - \tilde{x}|}{\tilde{\sigma}}. \quad (3.6)$$

2. Задаются уровнем значимости критерия ошибки q . Очевидно, этот уровень должен быть достаточно малым, чтобы вероятность ошибки была невелика. Из табл. 3.1 по заданным параметрам q и n находят предельное (граничное) значение коэффициента

Т а б л и ц а 3.1. Предельное значение коэффициента t_r

Число наблюдений n	Предельное значение t_r при уровне значимости q				Число наблюдений n	Предельное значение t_r при уровне значимости q			
	0,100	0,075	0,050	0,025		0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15	12	2,13	2,20	2,29	2,41
4	1,42	1,44	1,46	1,48	13	2,17	2,24	2,33	2,47
5	1,60	1,64	1,67	1,72	14	2,21	2,28	2,37	2,50
6	1,73	1,77	1,82	1,89	15	2,25	2,32	2,41	2,55
7	1,83	1,88	1,94	2,02	16	2,28	2,35	2,44	2,58
8	1,91	1,96	2,03	2,13	17	2,31	2,38	2,48	2,62
9	1,98	2,04	2,11	2,21	18	2,34	2,41	2,50	2,66
10	2,03	2,10	2,18	2,29	19	2,36	2,44	2,53	2,68
11	2,09	2,14	2,23	2,36	20	2,38	2,46	2,56	2,71

$$t_r = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{\tilde{\sigma}}. \quad (3.7)$$

3. Выполняют сравнение коэффициентов, определяемых по формулам (3.6) и (3.7). Если выполняются условия $t_1 > t_r$ и $t_n > t_r$, то результаты x_1 и x_n относят к промахам и исключают из результатов наблюдений.

Как видно из данных табл. 3.1, с уменьшением уровня значимости q коэффициент t_r увеличивается при данном числе наблюдений n . Это означает, что при снижении значения q , все меньшее число результатов наблюдений может быть отнесено к промахам, поскольку усложняется выполнение условия $t_1 > t_r$. Поэтому слишком малые значения q не используют и они опущены в табл. 3.1.

Пример 3.1. При определении сопротивления резистора получена упорядоченная выборка пяти следующих значений: 180 Ом; 182 Ом; 183 Ом; 184 Ом; 196 Ом. Требуется оценить результат измерения 196 Ом при заданном уровне значимости ошибки $q = 0,05$.

Решение. Для данной выборки по формулам (3.1) и (3.3) вычисляем оценки среднего арифметического значения $\tilde{R} = \bar{x} = 185,0$ Ом и СКО наблюдений $\tilde{\sigma} = 6,3$ Ом. Затем с помощью (3.6) вычисляем $t_5 = 1,75$. По табл. 3.1 для $n = 5$ и $q = 0,050$ находим $t_r = 1,67$. Так как $t_5 > t_r$, то результат 196 Ом считаем промахом и исключаем из выборки измерений.

Пример 3.2. Проверить результаты 18-ти многократных измерений (наблюдений) сопротивления резистора R (Ом), представленные в табл. 3.2, на наличие грубых погрешностей.

Таблица 3.2

R_i	8,619	8,380	8,498	8,484	8,340	8,526	8,394	8,641	8,420
R_i	8,553	8,522	8,408	8,283	8,494	8,399	8,561	8,551	8,669

Решение. Упорядочиваем результаты наблюдений R_i по возрастанию (см. табл. 3.3) и вводим их нумерацию.

Таблица 3.3

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_i	8,283	8,340	8,380	8,394	8,399	8,408	8,420	8,484	8,494
i	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R_i	8,498	8,522	8,526	8,551	8,553	8,561	8,619	8,641	8,669

Проверяем, не относятся ли минимальное $R_1 = 8,283$ Ом и максимальное $R_{18} = 8,669$ Ом значения наблюдений к грубым погрешностям. Порядок проверки следующий.

1. С помощью выражений (3.1)...(3.3) последовательно вычисляем оценку результата измерения $\tilde{x} = \tilde{R}$, абсолютную погрешность $\tilde{\Delta}_i$ каждого наблюдения (расчетные значения представлены в табл. 3.4) и оценку СКО наблюдений $\tilde{\sigma}$:

$$\tilde{R} = \tilde{x} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{n} = 8,486 \text{ Ом}, \quad \tilde{\sigma} \approx \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \tilde{\Delta}_i^2} = 0,106.$$

Таблица 3.4

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tilde{\Delta}_i$	-0,203	-0,146	-0,106	-0,092	-0,087	-0,078	-0,066	-0,002	0,008
i	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\tilde{\Delta}_i$	0,012	0,036	0,040	0,065	0,067	0,075	0,133	0,155	0,183

2. Проводим расчет коэффициентов t_1 и t_{18} по формуле (3.6):

$$t_1 = \frac{|x_1 - \tilde{x}|}{\tilde{\sigma}} = \frac{|8,283 - 8,486|}{0,106} = 1,903;$$

$$t_{18} = \frac{|x_{18} - \tilde{x}|}{\tilde{\sigma}} = \frac{|8,669 - 8,486|}{0,106} = 1,721.$$

3. Задаемся уровнем значимости ошибки $q = 0,1$. По числу проведенных наблюдений $n = 18$ и $q = 0,1$ из табл. 3.1 находим значение коэффициента $t_r = 2,34$.

4. Убеждаемся, что результаты наблюдений R_1 и R_{18} не являются грубыми погрешностями, так как $t_1 < t_r$ и $t_{18} < t_r$, и делаем аналогичный вывод для всех результатов наблюдений.

Критерий «трех сигм». Данный критерий применяется для результатов измерений, распределенных по нормальному закону, и одним из граничных параметров служит оценка СКО измерений $\tilde{\sigma}$. По этому критерию считается, что результат, полученный с вероятностью $q < 0,003$, маловероятен и его можно считать промахом, если $|x_i - \tilde{x}| > 3\tilde{\sigma}$. Значения $\tilde{x}$ и $\tilde{\sigma}$ вычисляют без учета экстремальных значений x_i . Данный критерий достаточно хорошо работает при числе измерений $n \geq 20 \dots 50$.

Проверка гипотезы о нормальном распределении результатов наблюдений

Поскольку закон распределения случайных погрешностей может либо соответствовать нормальному, либо отличаться от него, то по экспериментальным данным необходимо идентифицировать форму закона распределения,

т.е. проверить гипотезу о нормальном законе распределения случайных погрешностей результатов многократных наблюдений. Необходимость проверки гипотезы о нормальном законе распределения случайных погрешностей результатов наблюдений вызвана тем, что исходя из нее выполняется расчет параметров наблюдений. При числе результатов наблюдений $n \leq 15$ проверка их на принадлежность к нормальному распределению не производится. Если же $15 < n < 50$, то проверка выполняется по *составному критерию*, состоящему из двух критериев, методика применения которых приводится ниже.

Проверка гипотезы о нормальном распределении результатов наблюдений по составному критерию. Критерий 1. По результатам наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$ вычисляют значение параметра

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{x}|}{n\tilde{\sigma}^*}, \quad (3.8)$$

где $\tilde{x}$ — результат измерения, $\tilde{\sigma}^*$ — смещенная (относительно математического ожидания) оценка СКО наблюдений. Смещенная оценка СКО наблюдений рассчитывается по следующей формуле:

$$\tilde{\sigma}^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2}. \quad (3.9)$$

Далее выбирают уровень значимости критерия ошибки q_1 , равным 0,02 или 0,1. Из табл. 3.5 по выбранному q_1 и известному числу наблюдений n

Т а б л и ц а 3.5. Квантили распределения (статистика d)

Число наблюдений n	$q_1 = 0,02$		$q_1 = 0,1$	
	$d_{\min}$	$d_{\max}$	$d_{\min}$	$d_{\max}$
16	0,683	0,914	0,724	0,888
21	0,695	0,900	0,730	0,877
26	0,704	0,890	0,736	0,869
31	0,711	0,883	0,740	0,863
36	0,717	0,877	0,744	0,858
41	0,722	0,872	0,747	0,854
46	0,726	0,868	0,750	0,850
51	0,730	0,865	0,752	0,848

находят предельные значения параметра $\tilde{d}$, являющиеся квантилями нормального распределения:

$$d_{\min} = d_{1-\frac{q_1}{2}}, \quad d_{\max} = d_{\frac{q_1}{2}}. \quad (3.10)$$

Гипотезу о нормальном распределении результатов наблюдений по критерию 1 полагают верной, если выполняются следующие условия:

$$d_{\min} < \tilde{d} \leq d_{\max}. \quad (3.11)$$

К р и т е р и й 2. Для результатов наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$ вычисляют абсолютную погрешность каждого наблюдения $\Delta_i = x_i - \tilde{x}$ и оценку СКО наблюдений $\tilde{\sigma}$ по формулам (3.2) и (3.3).

Затем задаются уровнем значимости критерия q_2 , равным 0,01, 0,02 или 0,05. Из табл. 3.6 по двум показателям — выбранному q_2 и числу наблюдений n находят значение вероятности P , а только по n — значение теоретического коэффициента m .

Т а б л и ц а 3.6. Значения P для вычисления $z_{p/2}$

n	m	q_2		
		0,01	0,02	0,05
10	1	0,98	0,98	0,96
11...14	1	0,99	0,98	0,97
15...20	1	0,99	0,99	0,98
21...22	2	0,98	0,97	0,96
23	2	0,98	0,98	0,96
24...27	2	0,98	0,98	0,97
28...32	2	0,99	0,98	0,97
33...35	2	0,99	0,98	0,98
36...49	2	0,99	0,99	0,98

Из табл. 3.7 ряда значений функции Лапласа $\Phi(z) = 0,5\Psi(z)$, где $\Psi(z)$ — интеграл вероятностей (2.12), по величине $\Phi(z) = P/2$ находят аргумент функции $z = z_{p/2}$ и рассчитывают коэффициент $z_{p/2} \tilde{\sigma}$.

И наконец, подсчитывают экспериментальное число m , модулей погрешностей $|x_i - \tilde{x}|$, которое должно удовлетворять условию:

$$|x_i - \tilde{x}| > z_{p/2} \tilde{\sigma}. \quad (3.12)$$

Таблица 3.7. Значения функции Лапласа $\Phi(z)$

z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,0	0,4773	0,4778	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4865	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4889
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	0,4951	0,4952
2,6	0,4953	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4964
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4974
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4980	0,4980	0,4981
2,9	0,4981	0,4982	0,4983	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4986

Гипотезу о нормальном распределении результатов наблюдений по критерию 2 полагают верной, если $m_3 \leq m$. Гипотеза о нормальности распределения принимается, если выполняются оба критерия. Результирующий уровень значимости составного критерия $q \leq q_1 + q_2$.

Пример 3.3. Проверить гипотезу о нормальном законе распределения результатов наблюдений сопротивления резистора $R = x$ (далее в примере вместо R используем x), представленных в табл. 3.2 для $\Phi(z) = P/2 = 0,4950$.

Решение. Так как число наблюдений $15 < n < 50$, то выполняем проверку гипотезы по составному критерию.

Для критерия 1 выбираем уровень значимости $q_1 = 0,02$. С помощью выражений (3.9) и (3.8) вычисляем смещенную оценку СКО наблюдений $\tilde{\sigma}^*$ и параметр $\tilde{d}$, учитывая погрешности $\Delta_i = x_i - \bar{x}$ каждого наблюдения, найденные в примере 3.2 (см. данные табл.3.4): $\tilde{\sigma}^* = 0,104$; $\tilde{d} = 0,834$. Из табл. 3.5 для числа наблюдений $n=18$ и $q_1 = 0,02$ находим значения квантилей распределения $d_{\min} = 0,688$ и $d_{\max} = 0,908$, используя формулу линейной интерполяции:

$$d(n) = d(n_0) + \frac{n - n_0}{n_1 - n_0} [d(n_1) - d(n_0)],$$

где $n_0 = 16$ и $n_1 = 21$ — значения числа наблюдений в табл. 3.5, между которыми находится $n = 18$; $d(n_0)$, $d(n_1)$ — табличные значения квантилей распределения, соответствующие n_0 и n_1 ; $d(n)$ — искомое значение квантиля распределения для заданного n .

Так как условие (3.11) выполняется ($0,6877 < 0,8344 < 0,9082$), то делаем вывод о нормальности закона распределения результатов наблюдений по критерию 1.

Для критерия 2 задаем уровень значимости критерия $q_2 = 0,02$. Из табл. 3.6 по данным $q_2 = 0,02$ и $n = 18$ находим значение вероятности $P = 0,99$, а только по числу $n = 18$ — значение теоретического коэффициента $m = 1$. Затем из табл. 3.7 по значению функции Лапласа $\Phi(z) = P/2 = 0,4950$ находим ее аргумент $z = z_{P/2} = 2,6$. Воспользовавшись определенным в примере 3.2 значением СКО наблюдений $\tilde{\sigma}$, вычисляем коэффициент $z_{P/2} \tilde{\sigma} = 2,6 \cdot 0,107 = 0,277$. С помощью найденных в примере 3.2 значений погрешности каждого аргумента $\Delta_i = x_i - \tilde{x}$ (см. табл. 3.4) подсчитываем число m , модулей погрешностей $|x_i - \tilde{x}|$, которое превзошло значение $z_{P/2} \tilde{\sigma} = 0,277$. Поскольку $m_3 = 0$ и выполняется условие $m_3 \leq m$, по критерию 2 результаты наблюдений принадлежат к нормальному закону.

Учитывая, что оба критерия выполняются, гипотеза о нормальности результатов наблюдений величины x верна (принимается) с результирующим уровнем значимости составного критерия $q = q_1 + q_2 = 0,04$.

Доверительные границы случайной погрешности результата измерения

Оценка $\tilde{x} = \tilde{A}$ измеряемой величины $x_n = A$ является случайной величиной и, следовательно, отличается от нее на некоторую абсолютную погрешность $\Delta = \tilde{A} - A$. В связи с этим практический интерес представляет определение *доверительного интервала* $(\tilde{A} - \Delta_r, \tilde{A} + \Delta_r)$, в котором с заданной *доверительной вероятностью* P_d находится измеряемая величина $x_n = A_n$.

Напомним, что в доверительном интервале, равном $2\Delta_r$, погрешности $\pm\Delta_r$ называют *доверительными границами случайной погрешности результата измерения*, а $A_n = \tilde{A} - \Delta_r$ и $A_n = \tilde{A} + \Delta_r$ — *нижней и верхней границами доверительного интервала*. Аналитически доверительная вероятность записывается в следующем виде:

$$P(\tilde{A} - \Delta_r < A < \tilde{A} + \Delta_r) = P_d. \quad (3.13)$$

Границы доверительного интервала (доверительные границы) принято указывать симметричными относительно результата измерения. В более общем случае может быть задан и несимметричный доверительный интервал $(\tilde{A} - \Delta_{r1}, \tilde{A} + \Delta_{r2})$.

С целью единообразия представления случайных погрешностей при технических измерениях, доверительная вероятность принимается равной 0,95. Лишь для особо точных и ответственных измерений допускается использовать более высокую доверительную вероятность.

Если число наблюдений n велико, то для расчета доверительной границы Δ_r можно использовать нормальный закон распределения. При числе наблюдений $n \leq 20$ наиболее точный расчет Δ_r получается при использовании распределения Стьюдента, учитывающего число n .

При использовании нормального закона поиск доверительного интервала выполняется с помощью интеграла вероятностей $\Psi(z)$, значения которого приведены в табл. 2.1.

Задаются доверительной вероятностью P_d и по табл. 2.1 находят z , соответствующее $\Psi(z) = P_d$. Далее, учитывая z и заранее вычисленную оценку СКО результата измерений $\tilde{\sigma}_{\text{ср}} = S(\tilde{A})$, определяют доверительную границу случайной погрешности результата измерения:

$$\Delta_r = \varepsilon = z S(\tilde{A}). \quad (3.14)$$

Аналитически нижнюю A_n и верхнюю A_v границы доверительного интервала представляют в следующем виде:

$$A_n = \tilde{A} - z S(\tilde{A}); \quad A_v = \tilde{A} + z S(\tilde{A}).$$

Рассмотрим вопрос о применении распределения Стьюдента для поиска доверительного интервала. Значения коэффициентов $t(P_d, n)$ распределения приведены в табл. 2.2. Используя данные таблицы, по заданной доверительной вероятности P_d и известному числу наблюдений n находят соответствующий коэффициент Стьюдента $t(P_d, n)$. Далее определяют доверительную границу случайной погрешности результата измерения

$$\Delta_r = \varepsilon = t(P_d, n) S(\tilde{A}), \quad (3.15)$$

а также границы доверительного интервала:

$$A_n = \tilde{A} - t(P_d, n) S(\tilde{A});$$

$$A_v = \tilde{A} + t(P_d, n) S(\tilde{A}).$$

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

Пример 3.4. Для результатов наблюдений, представленных в табл. 3.2, найти границы доверительного интервала при доверительной вероятности $P_d = 0,95$.

Решение. Так как число наблюдений $n = 18$ меньше 20, то при поиске границ пользуемся распределением Стьюдента.

С помощью данных табл. 2.2 вычисляем коэффициент Стьюдента $t(P_d, n) = 2,13$ для заданных значений $P_d = 0,95$ и $n = 18$, используя выражение для линейной интерполяции, подобное по форме примененному в примере 3.3:

$$t(P_d, n) = t(P_d, n_0) + \frac{n - n_0}{n_1 - n_0} [t(P_d, n_1) - t(P_d, n_0)],$$

где $n_0 = 16$ и $n_1 = 25$ — значения числа наблюдений в табл. 2.2, между которыми нахо-

дится $n = 18$; $t(P_d, n_0) = 2,13$ и $t(P_d, n_1) = 2,06$ — табличные значения коэффициентов Стьюдента, соответствующие $P_d = 0,95$ и $n_0 = 16$, $n_1 = 25$.

Вычисляем оценку СКО результата измерения $\tilde{\sigma}_{\text{cp}} = S(\tilde{A})$ по формуле (3.4), учитывая $n = 18$ и оценку СКО наблюдений $\tilde{\sigma} \approx 0,11$ Ом, найденную в примере 3.2: $\tilde{\sigma}_{\text{cp}} = S(\tilde{A}) = 0,025$ Ом.

Проводим расчет границы случайной погрешности результата измерения Δ_r по формуле (3.15): $\Delta_r = \varepsilon = t(P_d, n_1) S(\tilde{A}) = 2,11 \cdot 0,025 \approx 0,05$ Ом.

Вычисляем нижнюю A_n и верхнюю A_v границы доверительного интервала при доверительной вероятности $P_d = 0,95$, используя найденную в примере 3.2 оценку результата измерения $\tilde{x} = \tilde{A} = 8,486 \approx 8,49$ Ом:

$$A_n = \tilde{A} - \Delta_r = 8,49 - 0,05 \approx 8,43 \text{ Ом}; \quad A_v = \tilde{A} + \Delta_r = 8,49 + 0,05 \approx 8,54 \text{ Ом}.$$

Границы неисключенных систематических погрешностей результата измерения

Как отмечалось выше, систематические погрешности измерений нельзя полностью исключить с помощью более точных приборов или методов измерений. Поэтому всегда остаются неисключенные систематические погрешности. Чаще всего НСП при повторных измерениях физической величины с применением других приборов аналогичного типа изменяются, но остаются в заданных границах. Поэтому подобные НСП принято рассматривать как случайные с равномерным симметричным законом распределения плотности вероятности и определять каждую границами $\pm \theta_i$. Причем в качестве границы θ_i принимают, например, пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений.

Общую границу $\theta = \theta(P_d)$ числа m неисключенных систематических погрешностей вычисляют по формуле:

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}, \quad (3.16)$$

где k — коэффициент, зависящий от значения m , принятой доверительной вероятности P_d и соотношения между составляющими θ_i . Вероятность P_d должна быть равна той, которая была принята при расчете доверительной границы случайной погрешности результата измерения.

Выбор коэффициента k производят в соответствии с табл. 3.8 и графиками на рис. 3.1, где параметр $l = \theta_1/\theta_2$ — отношение границ.

Таблица 3.8. Выбор коэффициента k

P_d	m	k
0,95	—	1,1
0,99	> 4	1,4
0,99	≤ 4	по графику $k(l)_m$

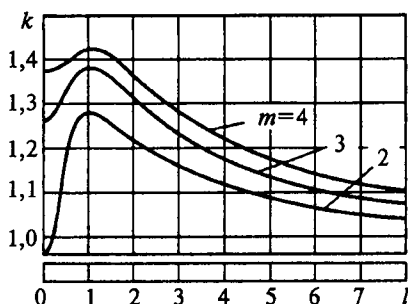


Рис. 3.1. График функции $k(l)_m$

При числе НСП, равном 3 или 4, в качестве границы θ_1 принимают ту, которая по значению наиболее отличается от остальных, а в качестве θ_2 — границу, ближайшую к θ_1 .

Границы погрешности результата измерения

В большинстве экспериментов на погрешность результата измерения с многократными наблюдениями влияют случайные погрешности и НСП. В этом случае границы погрешности результата измерения $\pm \Delta$ оцениваются в порядке, указанном ниже.

Пусть θ — граница НСП, определяемая по формуле (3.16), $S(\tilde{A})$ — оценка СКО результата измерения (3.4), а $\varepsilon = t(P_d, n) S(\tilde{A})$ — доверительная граница случайной погрешности результата измерения (3.15). Причем оценки θ и ε выполнены при одинаковой доверительной вероятности P_d .

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

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

3. В случаях, когда $0,8 S(\tilde{A}) < \theta < 8 S(\tilde{A})$, границу погрешности результата измерения в метрологии вычисляют путем композиции распределений случайных и неисключенных систематических погрешностей, рассматриваемых как случайные величины. Формула для вычислений границы погрешности такова:

$$\Delta_r = K S_\Sigma, \quad (3.17)$$

где K — коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенных систематических погрешностей; S_Σ — оценка суммарного СКО результата измерения.

Коэффициент K и оценка S_Σ вычисляются по формулам:

$$S_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\theta_i^2/3) + S^2(\tilde{A})}; \quad (3.18)$$

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S(\tilde{A}) + \sqrt{\sum_{i=1}^m (\theta_i^2 / 3)}}. \quad (3.19)$$

Однако выражения (3.17) ... (3.19) вызывают часто нарекания, так как дают явно заниженные оценки границы погрешности Δ_r . Более правомочным полагают оценивать границу погрешности результата измерения как $\Delta_r = |\theta| + \varepsilon$, где θ — общая граница неисключенных систематических погрешностей, определяемая по формуле (3.16); $\varepsilon = t(P_d, n)S(\tilde{A})$ — доверительная граница случайной погрешности результата измерения (3.15).

Для рассматриваемых симметричных доверительных границ погрешности результат измерения величины $x_n = A$ должен представляться в следующей форме:

$$x_n = A = \tilde{A} \pm \Delta(P_d). \quad (3.20)$$

где $\tilde{A}$ — оценка результата измерения, определяемого по (3.1).

Числовое значение результата измерения $\tilde{A}$ должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности Δ . Например, если $\Delta = 0,05$ В, то $\tilde{A} = 14,62$ В, но не $\tilde{A} = 14,6$ В или $\tilde{A} = 14,623$ В.

Рассмотрим вопрос об ограничении числа n многократных наблюдений, применяемых при измерении физической величины. В качестве критерия ограничения числа n целесообразно использовать условие $\theta < 0,8 S(\tilde{A})$. Действительно, с ростом n уменьшается $S(\tilde{A})$, что следует из выражения (3.4). Такое уменьшение целесообразно до достижения равенства $S(\tilde{A}) = \theta/8$. Дальнейшее увеличение числа наблюдений не имеет смысла, поскольку при оценке границы погрешности результата измерений случайной погрешностью пренебрегают. Поэтому максимальное число наблюдений $n_{\max}$ можно оценить при подстановке в условие $S(\tilde{A}) = \theta/8$ значения для $S(\tilde{A})$ из (3.4):

$$n_{\max} = (8 \tilde{\sigma} / \theta)^2, \quad (3.21)$$

где $\tilde{\sigma}$ — оценка СКО наблюдений, определяемая по (3.3).

3.3. Прямые однократные измерения

Прямые однократные измерения являются наиболее распространенными. В производственных условиях их точность часто оказывается вполне приемлемой, а простота выполнения, высокая производительность (количество

измерений в единицу времени) и низкая стоимость ставят однократное измерение вне конкуренции с любыми другими. Однако эти измерения возможны лишь при следующих условиях:

- объем априорной информации об объекте измерения такой, что аналитическая модель объекта и определение измеряемой величины не вызывают сомнений;

- метод измерения достаточно изучен, и его погрешности либо заранее устранены, либо оценены;

- средства измерений исправны, а их метрологические характеристики соответствуют установленным нормам.

Методика обработки результатов прямых однократных измерений указана в соответствующих нормативных документах, посвященных прямым однократным измерениям и оцениванию погрешностей результатов измерений. Применение методики возможно, если известны составляющие погрешности измерения, закон распределения случайных составляющих — нормальный, а неисключенных систематических погрешностей — равномерный с известными границами $\pm \theta$.

Результатом прямого однократного измерения физической величины $x_n = A_n$ является показание, снятое непосредственно с используемого средства измерения. До измерения должна быть проведена априорная оценка составляющих погрешности с использованием всех доступных данных. При определении доверительных границ погрешности результата измерений доверительная вероятность принимается, как правило, равной 0,95.

Погрешность результата прямого однократного измерения включает погрешность средства измерения (инструментальную погрешность), погрешность использованного метода и субъективную (личную) погрешность оператора. Каждая из этих составляющих может иметь неисключенные систематические погрешности и случайные.

Оценивание погрешностей прямых однократных измерений можно разделить на *точное и приближенное*.

Прямые однократные измерения с точным оцениванием погрешностей

Рассмотрим методику *точной* оценки. Пусть число неисключенных систематических погрешностей равно m и каждая задана либо границами $\pm \theta_i$, либо доверительными границами $\pm \theta_i(P_j)$, т.е. границами с известной доверительной вероятностью $P_j = P_d$. В первом случае *доверительная граница систематической составляющей результата измерения $\theta = \theta(P_d)$ оценивается с задаваемой доверительной вероятностью P_d по формуле (3.16); во втором — согласно соотношению:*

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2(P_j)}{k_j^2}}, \quad (3.22)$$

где k — коэффициент, зависящий от значений P_d и m , и порядок оценки которого приведен в табл.3.8, а k_j — коэффициент, зависящий от P_j и оцениваемый аналогично коэффициенту k .

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

Если случайные составляющие погрешности измерений представлены своими СКО S_i , приведенными в технической документации, то $\varepsilon = \varepsilon(P_d)$ вычисляется по формуле

$$\varepsilon = z_{P/2} S(\tilde{A}) = z_{P/2} \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i^2}, \quad (3.23)$$

где m — число составляющих; $z_{P/2} = z$ — аргумент функции Лапласа $\Phi(z)$, приведенной в табл. 3.7, соответствующий доверительной вероятности $\Phi(z) = P/2$; $S(\tilde{A})$ — оценка СКО результата однократного измерения величины A . При вероятности $P_d = 0,95$ принимают $z_{P/2} = 2$, а при $P_d = 0,99$ — $z_{P/2} = 2,6$.

Если случайные составляющие погрешности представлены своими СКО S_i , которые были определены на основе эксперимента при числе измерений $n < 20$, то $\varepsilon = \varepsilon(P_d)$ вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = t(P_d, n) S(\tilde{A}) = t(P_d, n) \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i^2}, \quad (3.24)$$

где $t(P_d, n)$ — коэффициент Стьюдента, определяемый из табл. 2.2 по заданным P_d и числу наблюдений n . Причем n должно быть равно минимальному числу измерений, которое выполнялось при поиске оценок СКО S_i .

Когда случайные составляющие погрешности измерений представлены доверительными границами $\varepsilon_i(P)$, соответствующими одинаковой доверительной вероятности $P = P_d$, тогда значение $\varepsilon = \varepsilon(P_d)$ рассчитывают так:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2(P)}. \quad (3.25)$$

Если случайные составляющие заданы доверительными границами $\varepsilon(P_i)$ с различной доверительной вероятностью $P_i = P_d$, то значение $\varepsilon = \varepsilon(P_d)$ с задаваемой вероятностью P_d может быть найдена согласно выражению:

$$\varepsilon = z_{P/2} S(\tilde{A}) = z_{P/2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon^2(P_i)}{z_{P_i/2}^2}}, \quad (3.26)$$

где $S(\tilde{A})$ — оценка СКО результата измерения; $z_{P/2}$ и $z_{P_i/2}$ — относительные аргументы функции Лапласа $\Phi(z)$, определяемые при значениях $\Phi(z) = P_d/2$ и $\Phi(z) = P_{d_i}/2$ соответственно по табл. 3.7.

Суммарная погрешность результата прямого однократного измерения $\Delta = \Delta(P_d)$ вычисляется в зависимости от соотношения $\theta/S(\tilde{A})$ по одной из формул, приведенных в табл. 3.9.

Таблица 3.9. Погрешности результата прямого однократного измерения

Значения $\theta/S(\tilde{A})$	Погрешности результата измерения Δ
$\theta/S(\tilde{A}) < 0,8$	$\Delta = \varepsilon(P_d)$
$0,8 \leq \theta/S(\tilde{A}) \leq 8$	$\Delta = K [\varepsilon(P_d) + \theta(P_d)]$
$\theta/S(\tilde{A}) > 8$	$\Delta = \theta(P_d)$

Значения коэффициента K при доверительных вероятностях $P_d = 0,95$ и $P_d = 0,99$ определяются по табл. 3.10.

Таблица 3.10. Значения коэффициента K

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

Соответствующим стандартом регламентирована форма записи результата прямого однократного измерения величины $x_n = A$:

$$x_n = \tilde{A} \pm \Delta(P_d), \quad (3.27)$$

где $\tilde{A}$ — результат измерения; P_d — доверительная вероятность погрешности результата прямого измерения Δ .

При отсутствии данных о видах функции распределения составляющих погрешности результата прямого однократного измерения или при необходимости дальнейшей обработки результатов, результат измерения представляют в форме $\tilde{A}, S(\tilde{A}), n, \theta$.

Прямые однократные измерения с приближенным оцениванием погрешностей

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

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

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

Пример 3.5. Оценить результат и погрешность однократного измерения значения напряжения на участке электрической цепи сопротивлением $R = 4$ Ом, выполненного вольтметром класса точности 0,5 % с верхним пределом измерения $U_B = 1,5$ В и внутренним сопротивлением $R_V = 1000$ Ом. Показание вольтметра $U_x = 0,90$ В. Известно, что дополнительные относительные погрешности показаний вольтметра из-за влияния магнитного поля и окружающей температуры не превышают соответственно значений $\delta_{\text{мп}} = \pm 0,75$ % и $\delta_t = \pm 0,3$ % допускаемой предельной относительной погрешности.

Решение. Инструментальная составляющая погрешности измерения определяется основной и дополнительной погрешностями. При показании вольтметра 0,90 В предел допускаемой относительной погрешности вольтметра на этой отметке в процентах равен:

$$\delta_x = \delta_{\text{си}} \frac{U_{\text{п}}}{U} = 0,5 \frac{1,5}{0,90} = 0,83 \, \%$$

Методическая погрешность определяется соотношением между сопротивлением участка цепи R и сопротивлением вольтметра R_v . При подсоединении вольтметра исходное напряжение U_x изменится из-за наличия сопротивления R_v и составит:

$$U = \frac{R}{R + R_v} U_x.$$

Отсюда относительная методическая погрешность:

$$\delta_m = \frac{\Delta U}{U} = \frac{U_v - U_x}{U_x} 100 = -\frac{R}{R + R_v} 100 = -\frac{4}{1004} 100 = -0,4\%.$$

Эта методическая погрешность является систематической и должна быть исключена из результата измерения путем введения поправки:

$$C = 0,9 - 0,4/100 = 0,004 \text{ В}.$$

Тогда результат измерения с учетом поправки на систематическую погрешность:

$$\tilde{U} = 0,90 \text{ В} + 0,004 \text{ В} = 0,904 \text{ В}.$$

Относительная погрешность результата измерения находится суммированием

$$\delta_x = 0,83 + 0,75 + 0,3 = 1,88\%.$$

Переходя к абсолютной суммарной погрешности, получим

$$\Delta_\Sigma = \delta_x U_x / 100 = \pm 0,017 \text{ В}.$$

Применив статистическое суммирование по формуле (3.16) при доверительной вероятности 0,95, получим значение доверительной границы неисключенных систематических погрешностей:

$$\theta = 1,1 \sqrt{0,83^2 + 0,75^2 + 0,3^2} = 1,3\%.$$

Находим абсолютную погрешность:

$$\Delta = \theta U_x / 100 = 0,012 \text{ В}.$$

Округляя, окончательный результат измерения можно представить в форме:

$$\tilde{U} = 0,90 \text{ В}; \Delta = 0,01 \text{ В}; P = 0,95.$$

3.4. Косвенные измерения

При косвенных измерениях физическая величина A , значение которой надо измерить, является известной функцией f ряда других величин — аргументов $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m$. Данные аргументы подвергаются прямым измерениям, а величина A вычисляется по формуле:

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (3.28)$$

В качестве *результата косвенного измерения* рассматривают оценку величины A , определяемую подстановкой в (3.28) оценок аргументов этой

функции. Каждый из аргументов измеряется с некоторой погрешностью, вносящей определенный вклад в результат косвенного измерения. Причем этот вклад зависит от вида функции (3.28). С учетом этого вида все косвенные измерения подразделяют на *линейные* и *нелинейные*. К линейным косвенным измерениям относятся только те, когда функция (3.28) представляет собой сумму из m составляющих вида $a_i x_i$, где a_i — некоторое число. При любом другом виде функции (3.28) косвенные измерения относятся к *нелинейным*.

При нелинейных косвенных измерениях возникают существенные сложности их статистической обработки, связанные с изменением законов распределения случайных величин (аргументов функции (3.28)) в результате их функциональных преобразований. В связи с этим проводят приближенную оценку погрешности результата косвенного измерения на основе линеаризации функции (3.28).

Методика обработки результатов косвенных измерений стандартизирована. В соответствующих документах рассмотрены случаи аналитического представления линейной и нелинейной функции (3.28) при отсутствии и наличии статистической связи (корреляции) между погрешностями измерений аргументов. Приводится критерий проверки гипотезы об отсутствии указанной корреляции.

Оценка результата и погрешностей косвенных измерений

Любой из аргументов в выражении (3.28) можно представить в виде:

$$x_i = \tilde{x}_i + \Delta_i = \tilde{x} + (\Delta_{ci} + \dot{\Delta}_i), \quad (3.29)$$

где x_i , $\tilde{x}_i$ и Δ_i — соответственно истинное значение, оценка и абсолютная погрешность результата измерения i -го аргумента, а параметры Δ_{ci} и $\dot{\Delta}_i$ — систематическая и случайная составляющие абсолютной погрешности Δ_i .

Задача состоит в том, чтобы с помощью функции (3.28) и ее аргументов найти *оценки результата косвенного измерения $\tilde{A}$ и его погрешности $\Delta(\tilde{A})$* в виде, подобном (3.29):

$$A = \tilde{A} + \Delta(\tilde{A}) = \tilde{A} + [\Delta_c(\tilde{A}) + \dot{\Delta}(\tilde{A})], \quad (3.30)$$

где $\Delta_c(\tilde{A})$ и $\dot{\Delta}(\tilde{A})$ — *систематическая и случайная составляющие погрешности косвенного измерения $\Delta(\tilde{A})$* . Для решения задачи подставим аргументы (3.29) в (3.28) и получим выражение:

$$\tilde{A} + \Delta(\tilde{A}) = f(\tilde{x}_1 + \Delta_1, \tilde{x}_2 + \Delta_2, \dots, \tilde{x}_m + \Delta_m). \quad (3.31)$$

Положим, что в последней формуле погрешности Δ_i аргументов малы по сравнению с оценкой $\tilde{x}_i$ аргументов и что в пределах изменения Δ_i допустима линеаризация функции (3.31). Учитывая это, разложим данную функцию в ряд Тейлора и оставим в нем только члены первого порядка:

$$\begin{aligned}\tilde{A} + \Delta(\tilde{A}) &= \tilde{A} + [\Delta_c(\tilde{A}) + \dot{\Delta}(\tilde{A})] = \\ &= f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m) + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta_i + \tilde{R} \approx \\ &\approx f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m) + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) (\Delta_{ci} + \dot{\Delta}_i),\end{aligned}\quad (3.32)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ — частные производные, вычисляемые при оценках $\tilde{x}_i$; $\tilde{R}$ — остаточный член ряда Тейлора (представлен для упрощения без вывода):

$$\tilde{R} = 0,5 \sum_{i=1, j=1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} (\Delta_i \Delta_j). \quad (3.33)$$

Из (3.32) получаем формулу для оценки результата косвенного измерения

$$\tilde{A} \approx f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m), \quad (3.34)$$

а также выражение для оценки его абсолютной систематической погрешности

$$\Delta_c(\tilde{A}) \approx \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta_{ci}, \quad (3.35)$$

в котором частные производные $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ называют коэффициентами влияния i -го аргумента, а слагаемые $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta_i$ — частными погрешностями.

На практике систематические погрешности Δ_i аргументов стремятся устранить, а их неисключенные остатки рассматривают как случайные, подчиняющиеся равномерному закону распределения. Поэтому выражение для оценки систематической погрешности косвенного измерения, приведенное далее, отличается от соотношения (3.35).

Для оценки случайной составляющей погрешности косвенного измерения $\dot{\Delta}(\tilde{A})$ вычитают формулы (3.34) и (3.35) из соотношения (3.32). В оставшемся выражении

$$\dot{\Delta}(\tilde{A}) \approx \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \dot{\Delta}_i \quad (3.36)$$

усредняют квадраты левой и правой части, что позволяет в итоге найти оценку СКО $S(\tilde{A})$ случайной погрешности результата косвенного измерения в зависимости от оценок СКО $\tilde{\sigma}_i$ случайных погрешностей аргументов:

$$S(\tilde{A}) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \tilde{\sigma}_i^2 + 2 \sum_{i=1, i < j}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \tilde{\sigma}_i \tilde{\sigma}_j \tilde{r}_{ij}}, \quad (3.37)$$

где $\tilde{r}_{ij}$ — оценка коэффициента корреляции, определяющего меру статистической связи случайных величин x_i и x_j . Все возможные значения оценки коэффициента корреляции $\tilde{r}_{ij}$ лежат в интервале от -1 до $+1$. Установление значения $\tilde{r}_{ij}$ обычно затруднительно. Поэтому рассматривают два случая: $\tilde{r}_{ij}=1$ (полная статистическая связь между аргументами) и $\tilde{r}_{ij}=0$ (отсутствие связи).

При $\tilde{r}_{ij}=0$ оценку СКО $S(\tilde{A})$ вычисляют по формуле:

$$S(\tilde{A}) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \tilde{\sigma}_i^2}. \quad (3.38)$$

Для использования выражений (3.37) и (3.38) требуется вычисление оценок СКО $\tilde{\sigma}_i$ аргументов функции (3.28) на основе обработки результатов их многократных наблюдений.

Рассмотрим частные случаи вычисления СКО косвенного измерения при отсутствии корреляции между погрешностями измерения аргументов.

Пусть функция (3.28) имеет вид суммы:

$$A = \sum_{i=1}^m a_i x_i. \quad (3.39)$$

Найдя ее частные производные $\frac{\partial f}{\partial x_i} = a_i$ и подставив их в (3.38), получим:

$$S(\tilde{A}) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m a_i^2 \tilde{\sigma}_i^2}. \quad (3.40)$$

Предположим, что функция (3.28) имеет вид произведения:

$$A = k x_1^\alpha x_2^\beta \dots x_m^\gamma, \quad (3.41)$$

где $k, \alpha, \beta, \dots, \gamma$ — константы. Определим ее частные производные по аргументам $x_1, x_2, \dots, x_m$ и подставим их в (3.38). После простых преобразований получим удобное для расчетов выражение:

$$\delta(\tilde{A}) = \frac{S(\tilde{A})}{\tilde{A}} = \sqrt{(\alpha \delta_1)^2 + (\beta \delta_2)^2 + \dots + (\gamma \delta_m)^2}, \quad (3.42)$$

где $\delta(\tilde{A})$ и $\delta_i = \frac{\sigma_i}{\tilde{x}_i}$ — соответственно *относительные СКО случайных погрешностей результата измерения $\tilde{A}$ и i -го аргумента.*

Доверительные границы случайной погрешности и неисключенных систематических погрешностей косвенных измерений

При косвенных измерениях, как и при рассмотренных ранее многократных наблюдениях при прямых измерениях, оценка результата измерения $\tilde{A}$ (3.34) является случайной величиной и отличается от истинного значения $x_n = A_n$. Поэтому практический интерес имеет оценка доверительного интервала ($\tilde{A} - \Delta_r, \tilde{A} + \Delta_r$), в котором находится x_n с заданной доверительной вероятностью P_d , где $\pm \Delta_r$ — *доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения.*

Если погрешности результатов измерения всех аргументов функции $A = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ имеют нормальный закон распределения, то доверительная граница Δ_r вычисляется по формуле, подобной (3.15):

$$\Delta_r = \epsilon = t(P_d, n) S(\tilde{A}),$$

где $t(P_d, n)$ — коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности P_d и некоторому целому положительному числу $n = f_3 + 1$; $S(\tilde{A}) = \tilde{\sigma}_{cp}$ — *оценка СКО результата косвенного измерения (3.38).*

Коэффициент f_3 — *эффективное число степеней свободы* распределения Стьюдента — рекомендуется рассчитывать по приближенной формуле:

$$f_3 = \left[\left(\sum_{i=1}^m b_i^2 \tilde{\sigma}_i^2 \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 \tilde{\sigma}_i^4}{n_i + 1} \right) \right]^{-2}, \quad (3.43)$$

где $b_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$; n_i — число измерений при определении аргумента x_i .

Граница θ неисключенных систематических погрешностей результата косвенного измерения определяется без учета знака по формуле:

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \theta_i^2}, \quad (3.44)$$

где θ_i — заданные границы результатов измерений неисключенных систематических погрешностей аргументов; k — поправочный коэффициент, значения которого определяются из табл. 3.8 и графиков на рис.3.1 с учетом задаваемой доверительной вероятности P_d для оценки значения θ , а также числа m составляющих θ_i .

Известно, что погрешность расчета границы θ неисключенных систематических погрешностей результатов измерений по формуле (3.44) не превышает 5 %.

Границы погрешности результата косвенного измерения

Суммарные границы $\pm \Delta$ погрешности результата косвенного измерения вычисляют с учетом границы неисключенных систематических погрешностей θ (3.44) и доверительной границы $\epsilon = \Delta_r$ случайной погрешности (3.15) в зависимости от отношения $\theta/S(\tilde{A})$, где $S(\tilde{A})$ — оценка СКО случайной погрешности косвенного измерения. Порядок такого учета аналогичен соответствующему учету для однократных прямых измерений и указан в табл. 3.9, где коэффициент K зависит от задаваемой доверительной вероятности ($P_d = 0,95$ или $P_d = 0,99$) и отношения $\theta/S(\tilde{A})$.

Значения коэффициента K при косвенных измерениях выбираются по табл. 3.10, как и при прямых однократных измерениях.

Результат косвенного измерения и его погрешность должны представляться в виде формулы:

$$x_n = \tilde{A} \pm \Delta(P_d). \quad (3.45)$$

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

Пример 3.6. *Обработка результата косвенного измерения. Оценка мощности, рассеиваемой на резисторе, проводилась по формуле:*

$$P_x = \frac{U_x^2}{R}.$$

Прямые измерения проведены в нормальных условиях цифровым мультиметром при времени преобразования $t_{np} = 20$ мс. Результаты измерения $U_x = 758,8$ мВ, $R = 5,3$ кОм, $\sigma_U = 1,5$ мВ, $\sigma_R = 0,015$ кОм. Результаты измерений не коррелированы. Измерения напряжения проводились на шкале 1000 мВ; при этом для цифрового мультиметра $c_U = 0,10$, $d_U = 0,05$. Сопротивление измерялось на шкале 10 кОм: соответственно $c_R = 0,20$; $d_R = 0,05$.

Определить и записать результат измерения мощности при доверительной вероятности $P_d = 0,95$.

Решение. Для исходных данных вычисляем измеряемое значение мощности

$$P_x = \frac{U_x^2}{R} = \frac{(0,7588)^2}{5,3 \cdot 10^3} = 108,6 \text{ мкВт}.$$

Определяем относительную систематическую погрешность измерения по формуле, аналогичной (3.42):

$$\delta_P = \sqrt{(2\delta_U)^2 + \delta_R^2}.$$

По формуле (2.35) вычисляем погрешности δ_U и δ_R по паспортным данным используемого мультиметра:

$$\delta_U = \pm \left[0,10 + 0,05 \left(\frac{U_k}{U_x} - 1 \right) \right] = \pm \left[0,10 + 0,05 \left(\frac{1000,0}{758,8} - 1 \right) \right] = \pm 0,12\%;$$

$$\delta_R = \pm \left[0,20 + 0,05 \left(\frac{R_k}{R_x} - 1 \right) \right] = \pm \left[0,20 + 0,05 \left(\frac{10,0}{5,3} - 1 \right) \right] = \pm 0,24\%.$$

Полученные значения δ_U и δ_R подставляем в выражение (3.42) для относительной систематической погрешности измерения мощности δ_P и находим:

$$\delta_P = \pm \sqrt{(2 \cdot 0,12)^2 + 0,24^2} = \pm 0,34\%.$$

Переходя к абсолютной погрешности, получаем:

$$\Delta_P = \pm \delta_P P_x = 0,0034 \cdot 108,6 = \pm 0,37 \text{ мкВт}.$$

Результат измерения мощности записываем в виде:

$$P = (108,60 \pm 0,37) \text{ мкВт}; \quad P_d = 0,95.$$

3.5. Совместные измерения

В практической метрологии часто используются совместные измерения. *Совместными* называют выполняемые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных физических величин с целью установления зависимости между ними. Пусть требуется определить зависимость $y = f(x)$ между x и y . Для этого необходимо изменять величину x и при каждом установленном значении x выполнять одновременное измерение ее величины и величины y . В результате таких измерений находятся координаты (x_i, y_i) искомой зависимости $y = f(x)$. Экспериментальные координаты x_i, y_i (где $i = 1, 2, \dots, n$ — число совместных измерений) отличаются от истинных координат (x, y) из-за систематических и случайных погрешностей измерений. Поэтому возникает задача наилучшей аппроксимации экспериментальной зависимости $y = f(x)$ по координатам x_i, y_i .

Оптимальный подход к решению подобных задач возможен на основе применения *метода наименьших квадратов*.

Метод наименьших квадратов

Сущность метода наименьших квадратов состоит в том, что наиболее вероятными значениями аргументов искомой аналитической зависимости будут такие, при которых сумма квадратов отклонений экспериментальных значений функции y_i от значений самой функции y , будет наименьшей:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 = \min. \quad (3.46)$$

Обычно функция y является функцией нескольких аргументов:

$$y = f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m),$$

где $a_0, a_1, \dots, a_m$ — неизвестные коэффициенты многочлена. Тогда на основании n экспериментальных пар y_i и x_i следует определить $m + 1$ искомым аргументов аналитической зависимости, которая наилучшим образом описывает массив y_i и x_i , т.е. в этом случае метод наименьших квадратов требует выполнения условия:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)]^2 = \min. \quad (3.47)$$

Применение метода наименьших квадратов при статистической обработке результатов измерений требует учета ряда условий:

- значения аргументов x_i известны точно;
- результаты измерений y_i независимы и содержат лишь случайные погрешности с одинаковыми дисперсиями;
- погрешности измерения y_i имеют нормальное распределение.

Первое условие приближенно выполняется за счет измерения значения x_i с меньшей погрешностью, чем y_i . Наличие только случайных погрешностей обеспечивается исключением из результатов измерений возможных систематических погрешностей.

На основе метода наименьших квадратов можно выполнять аппроксимацию различных аналитических зависимостей, например, выражаемых такими полиномами: $y = a + bx + cx^2 + \dots + ex^n$, где $a, b, c, \dots, e$ — константы.

Рассмотрим важный для практики случай, когда искомая зависимость имеет линейный характер вида

$$y = a + bx. \quad (3.48)$$

При использовании метода наименьших квадратов необходимо по набору из n экспериментальных координат (x_i, y_i) найти такие оценки неизвестных постоянных a и b , при которых получается прямая линия, наилучшим образом отражающая истинную анализируемую линию (3.48).

График функции (3.48) — прямая линия с коэффициентом $b = \operatorname{tg} \alpha$, пересекающая ось ординат в точке a (рис.3.2).

В соответствии с методом наименьших квадратов наилучшим оценкам a и b соответствует минимальное значение выражения:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2, \quad (3.49)$$

где $[y_i - (a + bx_i)]$ — отклонение измеренных значений y_i от вычисленных по формуле (3.48) при $x = x_i$.

Сумма (3.49) минимальна, если ее частные производные по a и b равны нулю:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2}{\partial a} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2}{\partial b} = 0. \quad (3.50)$$

Решая систему этих двух уравнений, находим формулы для оценок значений a и b :

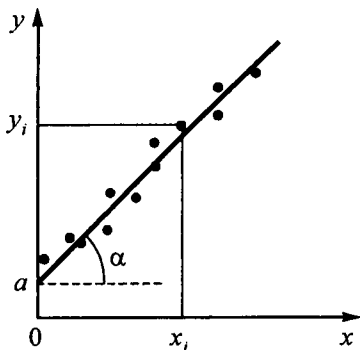


Рис. 3.2. Аппроксимация исследуемой зависимости

$$a = \frac{S_2 S_3 - S_1 S_4}{S_5}; \quad b = \frac{n S_4 - S_1 S_3}{S_5}, \quad (3.51)$$

где

$$S_1 = \sum_{i=1}^n x_i; \quad S_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2; \quad S_3 = \sum_{i=1}^n y_i;$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \quad S_5 = n S_2 - S_1^2. \quad (3.52)$$

Степень приближения найденных значений a и b к истинным значениям этих величин оценивается с помощью их СКО σ_a и σ_b :

$$\sigma_a = \sigma_y \sqrt{S_2/S_5}; \quad \sigma_b = \sigma_y \sqrt{n/S_5}. \quad (3.53)$$

где σ_y — СКО погрешности измерения величины y , значение которой можно получить из паспортных данных на средство измерения или вычислить по формуле:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (a + b x_i)]^2}{n - 2}}. \quad (3.54)$$

В качестве примера практического применения метода наименьших квадратов рассмотрим аппроксимацию нагрузочной характеристики одного из устройств преобразовательной техники. Для построения нагрузочной характеристики измеряют 5...10 пар значений выходного напряжения $U_{\text{вых}_i}$ и тока нагрузки $I_{\text{н}_i}$. Индекс $i=1, 2, \dots, n$ соответствует текущему измерению (n — число измерений). В данном примере было снято десять пар ($n=10$) экспериментальных точек $y_i = U_{\text{вых}_i}$ и $x_i = I_{\text{н}_i}$ напряжения и тока соответственно (см. табл.3.11 и рис. 3.3).

Таблица 3.11. Экспериментальные результаты

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{вых}_i}, \text{В}$	5,35	5,20	5,11	4,92	4,76	4,76	4,50	4,33	4,30	4,04
$I_{\text{н}_i}, \text{мА}$	105	110	129	148	154	181	190	206	225	241

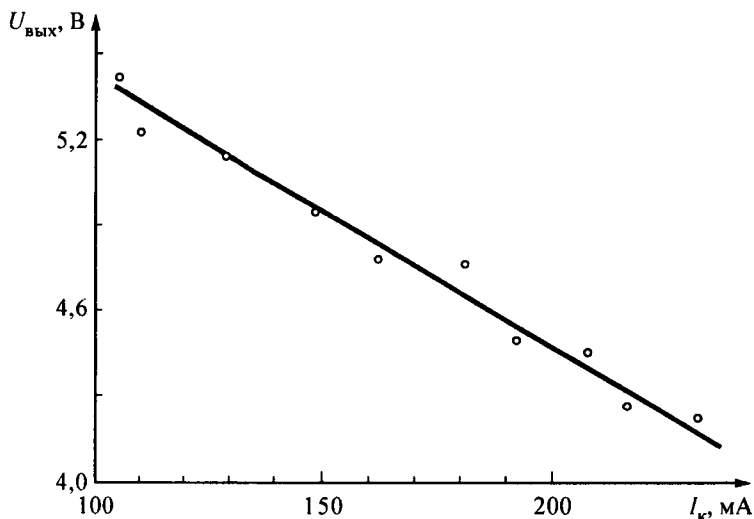


Рис.3.3. Аппроксимация исследуемой зависимости методом наименьших квадратов

Из расположения экспериментальных точек (рис. 3.3) видно, что аппроксимирующим уравнением может быть полином первой степени (3.48):

$$u = a + bi.$$

Таким образом, на основании массива экспериментальных данных по уравнениям (3.51) и (3.52) вычисляем коэффициенты a и b .

Расчет по уравнениям (3.51) и (3.52) дает значения коэффициентов аппроксимации a и b , равные $a = 6,24 \text{ В}$ и $b = -8,95 \cdot 10^{-3} \text{ В/мА} = -8,95 \text{ В/А}$. Следовательно, исследуемое устройство имеет нагрузочную характеристику, аналитически описываемую как:

$$U_{\text{вых}} = 6,24 - 8,95 \cdot 10^{-3} I_{\text{н}}.$$

На рис. 3.3 представлен график полученной методом наименьших квадратов аппроксимации нагрузочной характеристики.

Пример 3.7. Требуется установить реальную зависимость сопротивления металлического проводника от температуры $R_t = f(t)$ по результатам совместных измерений (табл. 3.12). При этом теоретическая зависимость определена как:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление проводника при 0°С ; α — температурный коэффициент сопротивления проводника; t — температура, 0°С .

Т а б л и ц а 3.12. Результаты совместных измерений

$t, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25
$R, \text{Ом}$	10,3	10,9	11,3	11,6

Преобразуем последнюю формулу к виду:

$$R_i = a + bt,$$

в которой $a = R_0$; $b = \alpha R_0$.

Расчеты по формулам (3.51) и (3.52) при $n = 4$, $x_i = t_i$ и $y_i = R_i$, дают следующие результаты:

$$a = 9,52 \text{ Ом}; \quad b = 0,09 \text{ Ом/град.}$$

Пусть средство измерения имеет СКО $\sigma_{R_i} = 0,2 \text{ Ом}$. Тогда, проведя вычисления по формулам (3.53), получим:

$$\sigma_a = 0,33 \text{ Ом}; \quad \sigma_b = 0,02 \text{ Ом/град.}$$

Окончательно имеем:

$$a + \sigma_a = (9,52 \pm 0,33) \text{ Ом}; \quad b + \sigma_b = (0,09 \pm 0,02) \text{ Ом/град.}$$

3.6. Погрешность и неопределенность результата измерения

После того, как все предполагаемые составляющие погрешности результата измерения оценены и внесены соответствующие поправки, все еще остается сомнение в том, что результат измерения близок к истинному значению измеряемой величины. До недавнего времени количественной мерой этого сомнения было принято использовать понятие «погрешности измерения». Однако классификация погрешности измерения на случайную и систематическую и построенные на таком разделении методы ее описания в последнее время перестали по разным причинам удовлетворять ряду метрологических требований. Поэтому стали поступать предложения по совершенствованию этих представлений, обосновывавшиеся «несоответствием принципов оценивания погрешностей современным практическим задачам».

По инициативе ряда международных метрологических организаций была предложена концепция нового представления результатов измерений. Ее суть проста. Обработка результатов измерений практически везде проводится с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики и везде погрешности разделяются на случайные и систематические. Однако модели погрешностей, значения доверительных вероятностей и формирование доверительных интервалов в разных странах заметно отличаются друг от друга, что затрудняет сличение результатов измерений.

Для устранения этих сложностей был разработано «Руководство по выражению неопределенности в измерениях» (Guide to the expression of uncer-

tainty in measurement, ISO/TAG — /WG3, Geneva, June 1992). Его основными положениями являются:

- запрет на использование таких понятий, как истинное и действительное значения измеряемой величины, погрешность, относительная погрешность, точность измерения, случайная и систематическая погрешности;

- вместо термина «погрешность измерения» введено понятие *«неопределенность измерения»*, трактуемое как «параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий дисперсию значений, которые можно обоснованно приписать измеряемой величине»;

- разделение составляющих неопределенности на два типа: А и В.

Неопределенности типа А можно количественно оценить статистическими методами на основе многократных измерений и описать традиционными характеристиками — дисперсией или СКО. Взаимодействие неопределенностей типа А описывается коэффициентом взаимной корреляции.

Неопределенности типа В могут быть оценены любыми другими методами, кроме статистических. Они должны описываться величинами, аналогичными дисперсии или СКО, поскольку именно эти характеристики можно использовать для объединения неопределенностей типа В как между собой, так и с неопределенностями типа А.

Очевидно, что неопределенность типа А не что иное, как *характеристика случайной составляющей погрешности результата измерения*, а неопределенность типа В — *характеристика неисключенной систематической погрешности*. Причем, объединение неопределенностей типа А и В проводится по тем же правилам, что и при объединении составляющих погрешности, т.е. суммированием дисперсий.

Итак, ничего не меняя по существу, замена понятия «погрешность» на «неопределенность», несущую ту же смысловую нагрузку, приведет лишь к путанице в мыслях, публикациях и документах. Поэтому пока нет жестких оснований отказываться от традиционного, привычного термина «погрешность измерений».

Рассмотренные рекомендации еще не вошли в нормативные документы метрологических органов Российской Федерации. Тем не менее многие метрологи склоняются к мнению, что понятие «неопределенность измерения» надо постепенно вводить в практику, но пока не вместо понятия «погрешность», а наряду с ним. При этом можно ожидать, что в силу международного характера «Руководства по выражению неопределенности измерения» российские метрологи будут вынуждены перейти на новую терминологию.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные алгоритмы обработки результатов прямых многократных измерений.
2. Какие меры используются для исключения систематических погрешностей из результатов прямых многократных наблюдений?
3. Что собой представляют неисключенные остатки систематических погрешностей?
4. Что такое грубые погрешности? Как определить их присутствие в выборке?
5. Что представляет собой критерий оценки аномальности результатов наблюдений?
6. Расскажите о критерии «трех сигм».
7. Для чего необходимо идентифицировать форму закона распределения результатов измерений? Расскажите, каким образом это делается.
8. Как определяются границы неисключенных остатков систематических погрешностей измерений?
9. В каких случаях используют доверительную вероятность и доверительный интервал случайных погрешностей?
10. Как определяются границы погрешности результата измерения?
11. Каков порядок обработки результатов однократных измерений с точным оцениванием погрешностей?
12. Как обрабатываются результаты однократных измерений с приближенным оцениванием погрешностей?
13. Как принято обрабатывать результаты линейных и нелинейных косвенных измерений?
14. В чем состоит метод линеаризации и как он используется для обработки результатов косвенных измерений?
15. Как определяют границы погрешности результата косвенных измерений?
16. Каков алгоритм обработки результатов совместных измерений?
17. В чем состоит суть метода наименьших квадратов?
18. Каким образом связаны между собой погрешность и неопределенность результата измерения?

ЧАСТЬ II

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Глава 4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ. ИМПУЛЬСНАЯ И ЦИФРОВАЯ ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Данный раздел в некотором роде относится к формальным в метрологии, теории и практике измерительных устройств и является справочным для студентов, еще в достаточной мере не знакомых с измерительными сигналами и основами импульсной и цифровой техники. Поэтому ниже приводятся только некоторые основополагающие сведения для понимания и усвоения дальнейшего материала по современным измерительным сигналам, методам, средствам и технике измерений.

4.1. Общие сведения об измерительных сигналах

Сигнал (от лат. *signum* — знак) — физический процесс (или явление), несущий информацию о состоянии какого-либо объекта наблюдения. С точки зрения метрологии *измерительным сигналом* называется материальный носитель информации, представляющий собой некоторый физический процесс, один из параметров которого функционально связан с измеряемой физической величиной.

В метрологии измерительные сигналы являются в основном электрическими и описывают различными математическими моделями. Наиболее распространено *временное* и *спектральное (частотное)* представление и описание электрических сигналов.

Во временной области применяют определенные функции времени $u(t) = f(t, U, \omega, \varphi, \dots)$, наиболее точно описывающие изменение сигнала (например, отраженного в виде напряжения), в которых один из параметров U, ω, φ и т.д. зависит от измеряемой величины.

Спектральное представление электрических измерительных сигналов играет особую роль в процессе их генерации, передачи, приема и обработки, так как оно по существу определяет параметры и характеристики используемой аппаратуры.



Рис. 4.1. Классификация измерительных сигналов

Обобщенная классификация измерительных сигналов по различным признакам показана на рис. 4.1.

По характеру изменения информативного и временного параметров измерительные сигналы делятся на аналоговые, дискретные (от лат. *discretus* — разделенный, прерывистый) и цифровые.

Если физический процесс, порождающий сигнал, можно представить непрерывной функцией времени $u(t)$ (рис. 4.2, а), то такой сигнал называют *аналоговым (непрерывным)*.

Математическая модель *дискретного сигнала* $u_d(t)$ — последовательность точек на временной оси, в каждой из которых заданы амплитудные значения соответствующего непрерывного сигнала (рис. 4.2, б). Эти значения называются *выборками*, или *отсчетами*. Такие сигналы описываются решетчатыми функциями.

Цифровым называют сигнал с конечным числом дискретных уровней, поскольку уровни можно пронумеровать числами с конечным количеством разрядов. В цифровом сигнале дискретные значения сигнала $u_T(t)$ заменяются числами $u_d(t)$, чаще всего реализованными в двоичном коде, который представляют *высоким (единица)* и *низким (нуль)* уровнями потенциалов напряжения (рис. 4.2, в).

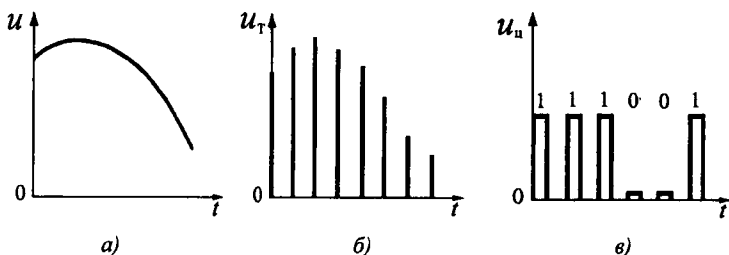


Рис. 4.2. Форма представления измерительных сигналов:
а — аналогового; б — дискретного; в — цифрового

По характеру изменения во времени измерительные сигналы делятся на *постоянные*, амплитуда которых с течением времени не изменяется, и *переменные*, мгновенные значения которых меняются во времени.

Переменные сигналы бывают непрерывными во времени и импульсными. К *непрерывным* относятся сигналы, параметры которых изменяются во времени непрерывно. *Импульсный* сигнал — это сигнал с конечной энергией, существенно отличный от нуля в течение ограниченного интервала времени.

По математическому представлению (по степени наличия *априорной информации*) все измерительные сигналы делятся на две основные группы: детерминированные (регулярные) и случайные.

Детерминированными называют радиотехнические сигналы, мгновенные значения которых в любой момент времени достоверно известны, т. е. предсказуемы с вероятностью, равной единице. Детерминированными являются сигналы измерительных мер. Например, выходной сигнал генератора гармонического сигнала (рис. 4.3, а) характеризуется значениями амплитуды, частоты и начальной фазы, которые установлены на его органах управления. Детерминированные сигналы бывают *периодическими* и *импульсными*.

Случайные сигналы — это сигналы, мгновенные значения которых в любые моменты времени не известны и не могут быть предсказаны с вероятностью, равной единице (рис. 4.3, б).

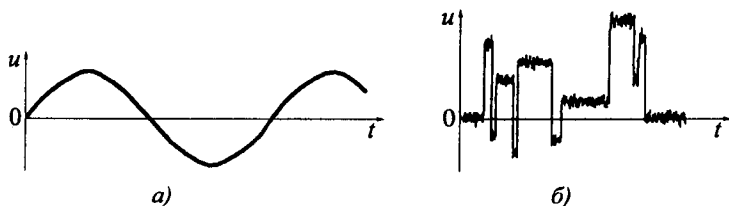


Рис. 4.3. Измерительные сигналы:
а — детерминированный; б — случайный

Случайные сигналы делятся на стационарные и нестационарные. *Стационарными* называют случайные сигналы, статистические характеристики которых не изменяются во времени. Остальные случайные сигналы — *нестационарные*. Стационарные случайные сигналы бывают *эргодическими* и *неэргодическими* (см. гл.13).

Классификация помех

Как правило измерительные сигналы редко действуют в средствах измерений в чистом виде — на них накладываются помехи. Под *помехой* понимается электрическое колебание, однородное с измерительным сигналом и действующее одновременно с ним. Ее наличие приводит к появлению погрешности измерения. Помехи классифицируют по ряду признаков.

По месту возникновения в измерительной схеме помехи делятся на внешние и внутренние.

Причиной возникновения *внешних* помех являются природные процессы и работа различных технических систем. Последние создают так называемые *индустриальные* помехи, возникающие из-за резких изменений тока в электрических цепях различных электротехнических устройств. Сюда относятся помехи от электротранспорта, электрических двигателей, медицинских установок, систем зажигания двигателей внутреннего сгорания и т. п.

Внутренние помехи обусловлены процессами, происходящими при работе самого средства измерений. Практически в любом диапазоне частот имеют место внутренние шумы радиотехнических устройств, обусловленные хаотическим движением носителей заряда в усилительных приборах, резисторах и других элементах аппаратуры.

Возможны два сочетания измерительного сигнала и шума. Если измерительный сигнал складывается с шумом, то помеха — *аддитивная* (от англ. *addition* — сложение). При перемножении измерительного сигнала и шума возникает *мультипликативная* (от англ. *multiplication* — умножение) помеха.

По основным свойствам аддитивные помехи можно разделить на три класса: сосредоточенные по спектру (узкополосные помехи), импульсные помехи (сосредоточенные во времени) и флуктуационные помехи, не ограниченные ни во времени ни по спектру.

По виду частотного спектра помехи делятся также на *белый* и *нестационарный* шумы. Спектральные составляющие белого шума равномерно распределены по всему частотному диапазону. Нестационарный шум имеет неравномерный спектр.

Сосредоточенными по спектру называют помехи, основная часть мощности которых находится на отдельных участках диапазона частот, меньших полосы пропускания радиотехнической системы.

Импульсными помехами называется регулярная или хаотическая последовательность импульсных сигналов, однородных с полезным сигналом. Ис-

точниками таких помех являются цифровые и коммутирующие элементы радиотехнических цепей или работающего рядом с ними устройства. Импульсные и сосредоточенные помехи часто в радиотехнике называют *наводками*.

Флуктуационная помеха (шум) представляет собой случайный процесс с нормальным распределением. Этот вид помех имеет место практически во всех реальных измерительных каналах и их часто называют шумами.

Большую часть электрических помех можно устранить путем экранирования, заземления приборов, применения специальных методов фильтрации.

4.2. Математическое описание измерительных сигналов

Вспомогательные сигналы, действующие в импульсных и цифровых измерительных системах, представляют собой различные последовательности импульсов определенной формы. Одна из основных форм — прямоугольный импульс. Импульсные периодические и одиночные сигналы имеют достаточно широкий спектральный состав.

Периодические и импульсные измерительные сигналы

Периодические сигналы. Периодическим называют любой измерительный сигнал, повторяющийся через регулярные интервалы времени (рис. 4.4, а) и удовлетворяющий условию: $u(t) = u(t + nT)$, где T — период повторения (следования) импульсов; $n = 0, 1, 2, \dots$

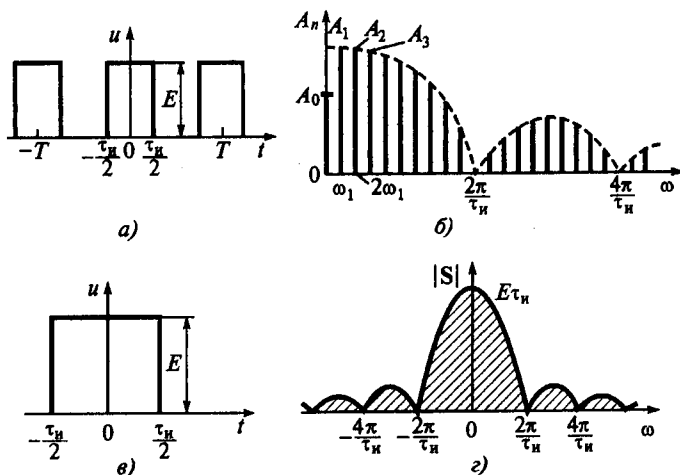


Рис. 4.4. Прямоугольные импульсы:

а, б — периодическая последовательность и ее спектр;
 в, г — одиночный импульс и его спектральная плотность

Периодическая последовательность импульсов описывается рядом:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_0(t - nT). \quad (4.1)$$

Здесь $u_0(t)$ — форма одиночного импульса, характеризующаяся следующими параметрами: амплитудой (высотой) E ; длительностью (шириной) τ_n ; периодом следования $T = 1/F$ ($F = \omega_1/2\pi$ — циклическая частота следования); положением импульсов во времени относительно тактовых точек.

Одиночный прямоугольный импульс (рис. 4.4, а) описывают уравнением:

$$u(t) = E[\sigma(t + \tau_n/2) - \sigma(t - \tau_n/2)], \quad (4.2)$$

т.е. он формируется как разность двух единичных функций $\sigma(t)$ (функций включения, или функций Хевисайда), сдвинутых во времени на τ_n .

Последовательность прямоугольных импульсов представляет собой известную сумму одиночных импульсов:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} E[\sigma(t + kT + \tau_n/2) - \sigma(t - kT - \tau_n/2)]. \quad (4.3)$$

Отношение периода к длительности прямоугольного импульса называется *скважностью* $q = T/\tau_n$.

Представим периодический сигнал тригонометрической формой ряда Фурье:

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t). \quad (4.4)$$

В этом соотношении:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) dt \quad (4.5)$$

— постоянная составляющая;

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \cos n\omega_1 t dt \quad (4.6)$$

— амплитуды косинусоидальных составляющих;

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \sin n\omega_1 t dt \quad (4.7)$$

— амплитуды синусоидальных составляющих.

Часто удобнее (4.4) представлять эквивалентной формой ряда Фурье:

$$u(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n), \quad (4.8)$$

где $A_0 = a_0/2$, $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ — амплитуда; $\varphi_n = \arctg(b_n/a_n)$ — начальная фаза n -й гармоники сигнала.

Периодический сигнал обладает линейчатым (дискретным) спектром. Спектральную составляющую с частотой $\omega_1 = 2\pi/T$ в радиотехнике называют *первой (основной) гармоникой*, а составляющие с частотами $n\omega_1$ ($n > 1$) — *высшими гармониками* периодического сигнала.

Наиболее наглядно о спектре сигнала можно судить по спектральной диаграмме. Различают *амплитудно-частотные* и *фазочастотные спектры*. Совокупность амплитуд гармонических составляющих A_n носит название *спектра амплитуд*, φ_n — *спектра фаз*.

На спектральных диаграммах по оси абсцисс откладывают текущую частоту, а по оси ординат — либо вещественную (рис. 4.4, б), либо комплексную амплитуду, или фазу соответствующих гармонических составляющих анализируемого сигнала. Спектр периодического сигнала принято называть *линейчатым* или *дискретным*, так как он состоит из отдельных линий, высота которых равна амплитуде A_n соответствующих гармоник.

Частота первой гармоники спектра сигнала равна частоте следования импульсов $f_1 = \omega_1/(2\pi) = 1/T$, частота второй — удвоенной частоте следования импульсов $2f_1$ и т. д. Амплитуды гармоник с увеличением их номера уменьшаются, поэтому считают, если полоса пропускания схемы лежит в пределах от $1/\tau_n$ до $3/\tau_n$, то она не вносит заметных искажений в передаваемый импульсный сигнал.

Непериодические (импульсные) сигналы. В практике измерений встречаются непериодические сигналы, отражающие физическую величину на небольшом интервале времени (рис. 4.4, в). Эти сигналы имеют сплошной спектр и описываются интегральными преобразованиями Фурье:

$$S(\omega) = \dot{S}(\omega) = S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (4.9)$$

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (4.10)$$

Соотношения (4.9) и (4.10) называются соответственно *прямым* и *обратным преобразованиями Фурье*. Они связывают между собой вещественную функцию времени (сигнал) $u(t)$ и комплексную функцию частоты $S(\omega)$.

Пример 4.1. Определить спектральную плотность прямоугольного импульса напряжения, имеющего амплитуду E и длительность τ_n (рис. 4.4, в).

Решение. Поскольку анализируемый сигнал расположен на временном интервале $-\tau_n/2, \tau_n/2$, то, в соответствии с (4.9), получим:

$$S(\omega) = \int_{-\tau_n/2}^{\tau_n/2} E e^{-j\omega t} dt = E \int_{-\tau_n/2}^{\tau_n/2} (\cos \omega t - j \sin \omega t) dt = E \tau_n \frac{\sin(\omega \tau_n/2)}{\tau_n/2}.$$

Спектральная плотность прямоугольного импульса (рис. 4.4, з) содержит все гармоники, начиная с нулевой (постоянный ток). На частотах, соответствующих нулевым значениям огибающей спектральной плотности, амплитуды гармоник равны нулю.

Математические модели элементарных измерительных сигналов

Дельта-функция. Рассмотрим теоретическую модель бесконечно короткого импульса с бесконечно большой амплитудой (рис. 4.5, а), аналитически определяемого формулой:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0, \\ 0, & t \neq 0. \end{cases} \quad (4.11)$$

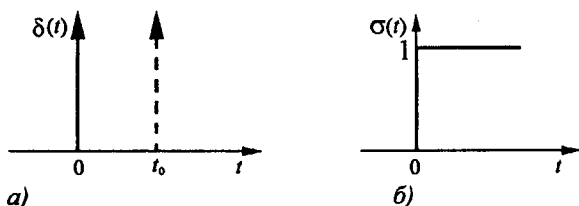


Рис. 4.5. Графики моделей простейших сигналов:
а — дельта-функции; б — единичной функции

Площадь такого импульса всегда равна единице:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (4.12)$$

Функцию $\delta(t)$ называют *дельта-функцией*, *единичным импульсом*, *функцией Дирака*, и она имеет физическую размерность циклической частоты — с^{-1} . При сдвиге дельта-функции по оси времени на интервал t_0 (рис. 4.5, а) определения (4.11) и (4.12) необходимо записать в более общей форме:

$$\delta(t - t_0) = \begin{cases} \infty, & t = t_0, \\ 0, & t \neq t_0; \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1. \quad (4.14)$$

Дельта-функция обладает важнейшим свойством, благодаря которому она получила широкое применение в математике, физике, радио- и измеритель-

ной технике. Пусть имеется некоторая непрерывная функция времени $f(t)$. Тогда, согласно формулам (4.13) и (4.14), справедливо соотношение:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - t_0) dt = f(t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = f(t_0). \quad (4.15)$$

Выражение (4.15) характеризует *фильтрующее (выделяющее, или стробирующее* — от слова «строб» — короткий прямоугольный импульс) свойство дельта-функции, которое используется для представления дискретизированных во времени сигналов с шагом дискретизации $T = \Delta t$.

Единичная функция. Предельное, упрощенное аналитическое выражение данного сигнала (рис. 4.5, б) принято записывать так:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0. \end{cases} \quad (4.16)$$

Функцию $\sigma(t)$ называют *единичной функцией, функцией включения или функцией Хевисайда*.

Спектральная плотность гармонического сигнала. Определим спектральную плотность сигнала $u(t) = \cos \omega_0 t$. Подставив в прямое преобразование Фурье (4.9) заданный сигнал, и воспользовавшись формулой Эйлера $e^{jx} = \cos x + j \sin x$, находим:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos \omega_0 t e^{-j\omega t} dt = 0,5 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega - \omega_0)t} dt + 0,5 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega + \omega_0)t} dt. \quad (4.17)$$

Последнее соотношение можно записать в следующем виде:

$$S(\omega) = |S(\omega)| = S(\omega) = \pi [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]. \quad (4.18)$$

Итак, гармоническому (в данном случае косинусоидальному) сигналу с конечной амплитудой соответствует дискретный спектр, состоящий из двух линий бесконечно большой амплитуды в виде дельта-функций, расположенных симметрично относительно нуля на частотах $-\omega_0$ и ω_0 (рис. 4.6).

По аналогии с косинусоидальным сигналом нетрудно показать, что синусоидальному сигналу $u(t) = \sin \omega_0 t$ отвечает спектральная плотность

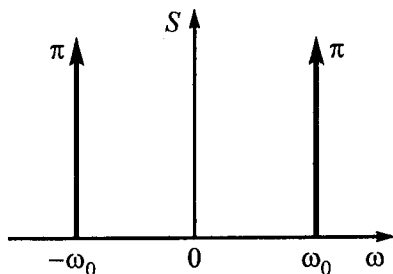


Рис. 4.6. Спектральная плотность гармонического сигнала

$$S(\omega) = \pi [\delta(\omega - \omega_0) - \delta(\omega + \omega_0)]. \quad (4.19)$$

Здесь знак минус — следствие нечетности функции синуса.

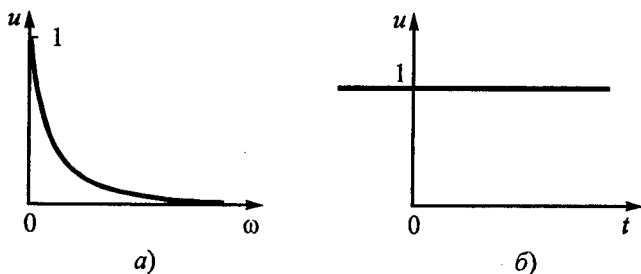


Рис. 4.7. Графики моделей:
а — экспоненциального импульса; б — постоянного сигнала

Экспоненциальный импульс. Это сигнал с «полубесконечной» длительностью (рис. 4.7, а) и при единичной амплитуде описывается как

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ e^{-\alpha t}, & t \geq 0, \end{cases} \quad (4.20)$$

где $\alpha > 0$ — вещественный параметр.

Постоянный сигнал (напряжение, ток) — самый простой из элементарных сигналов (рис. 4.7, б).

Математические модели сложных измерительных сигналов

Сигналы с линейными участками. В измерительной технике применяют периодические сигналы с линейными участками. Это линейный знакопеременный и однополярный линейно изменяющийся (пилообразный) сигналы.

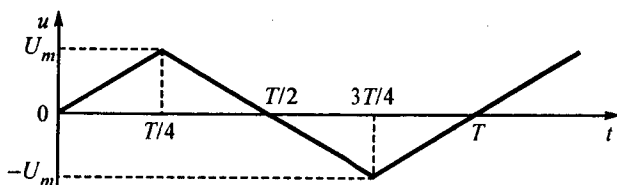


Рис. 4.8. Линейный знакопеременный сигнал

Линейный знакопеременный сигнал (рис. 4.8) описывается уравнением:

$$U(t) = \begin{cases} 4U_m t/T, & \text{при } 0 \leq t \leq T/4; \\ 4U_m (T/4 - t) + U_m, & \text{при } T/4 \leq t \leq 3T/4; \\ 4U_m (t - 3T/4)/T - U_m, & \text{при } 3T/4 \leq t \leq T. \end{cases} \quad (4.21)$$

Модулированные сигналы. В метрологии под *модуляцией* понимается процесс, при котором измерительный сигнал $e(t)$ воздействует на какой-либо

параметр некоторого стационарного сигнала $u_n(t)$, обладающего такими физической природой и характером изменения во времени, при которых удобны его дальнейшие преобразование и передача. В качестве стационарного сигнала, именуемого *несущим*, обычно выбирают либо последовательность импульсов, либо синусоидальное (гармоническое) колебание:

$$u_n(t) = U_n \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_n \cos \psi(t), \quad (4.22)$$

где U_n — амплитуда в отсутствие модуляции; ω_0 — угловая (круговая) частота; φ_0 — начальная фаза; $\psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$ — полная фаза.

В зависимости от того, какой из параметров гармонического несущего колебания подвергается воздействию, различают *амплитудную*, *частотную*, *фазовую* и ряд видов импульсной модуляции.

Физический процесс, обратный модуляции, называется *демодуляцией*, или *детектированием*, и заключается в получении из модулированного колебания сигнала, пропорционального модулирующему.

Наиболее простым модулированным сигналом является *амплитудно-модулированный сигнал*, в котором измерительная информация заложена в амплитуду $U_n(t)$ несущего колебания (рис. 4.9):

$$u_n(t) = U_n(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = [U_n + k e(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4.23)$$

где k — безразмерный коэффициент пропорциональности.

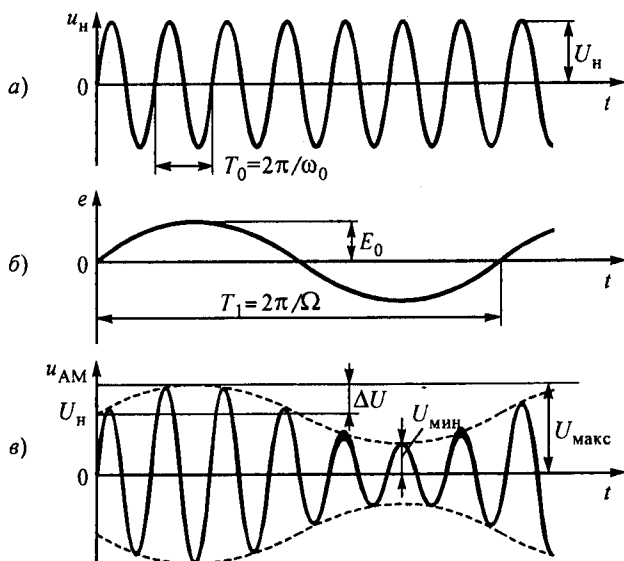


Рис. 4.9. Амплитудная модуляция:

a — несущее колебание; b — модулирующий сигнал; c — АМ-сигнал

Пусть модулирующий сигнал — гармоническое колебание вида

$$e(t) = E_0 \cos \Omega t, \quad (4.24)$$

где E_0 — амплитуда; $\Omega = 2\pi/T_1$ — круговая частота; T_1 — период.

Тогда, приняв для упрощения $\varphi_0 = 0$, и подставив формулу (4.24) в (4.23), получим выражение для АМ-сигнала:

$$u_{AM}(t) = (U_n + kE_0 \cos \Omega t) \cos \omega_0 t = U_n (1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad (4.25)$$

где $kE_0 = \Delta U$ максимальное отклонение амплитуды АМ-сигнала от амплитуды несущей U_n ; $M = kE_0/U_n = \Delta U/U_n$ — коэффициент или глубина амплитудной модуляции.

Графики несущего колебания с начальной фазой $\varphi_0 = 90^\circ$, модулирующего сигнала и АМ-сигнала показаны на рис. 4.9, а – в.

Сигналы с частотной модуляцией. При частотной модуляции несущая частота $\omega(t)$ связана с модулирующим сигналом $e(t)$ зависимостью:

$$\omega(t) = \omega_0 + k_\omega e(t), \quad (4.26)$$

где k_ω — размерный коэффициент пропорциональности.

Рассмотрим *однотональную частотную модуляцию*, когда модулирующим сигналом является гармоническое колебание $e(t) = E_0 \cos \Omega t$. Пусть $\varphi_0 = 0$. Полную фазу ЧМ-сигнала в любой момент времени t определим путем интегрирования частоты, выраженной через формулу (4.26):

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \int_0^t (\omega_0 + k_\omega E_0 \cos \Omega t) dt = \omega_0 t + \frac{\omega_{дч}}{\Omega} \sin \Omega t, \quad (4.27)$$

где $\omega_{дч} = k_\omega E_0$ — максимальное отклонение частоты от значения ω_0 , или *девиация частоты* при частотной модуляции.

Отношение $m_\omega = \omega_{дч}/\Omega = k_\omega E_0/\Omega$, являющееся *девиацией фазы* несущего колебания, называют *индексом частотной модуляции*.

С учетом этого выражения и (4.27) ЧМ-сигнал запишется как

$$u_{ЧМ}(t) = U_n \cos \psi(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_\omega \sin \Omega t). \quad (4.28)$$

На рис. 4.10 представлены временные диаграммы соответственно несущего колебания $u_n(t)$ и модулирующего сигнала $e(t)$ и полученный в результате процесса частотной модуляции ЧМ-сигнал $u_{ЧМ}(t)$.

Фазовая модуляция. При однотональной модуляции фаза несущего колебания:

$$\psi(t) = \omega_0 t + k_\phi E_0 \cos \Omega t = \omega_0 t + m_\phi \cos \Omega t, \quad (4.29)$$

где k_ϕ — коэффициент пропорциональности; $m_\phi = k_\phi E_0$ — *индекс фазовой модуляции*.

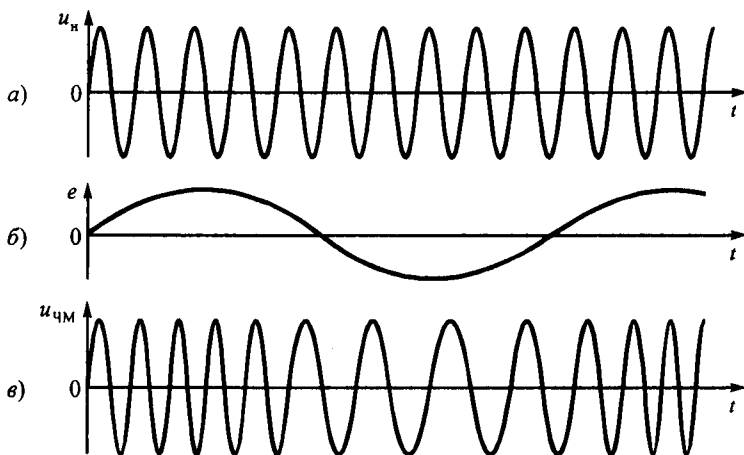


Рис. 4.10. Частотная однотоновая модуляция:
 а — несущее колебание; б — модулирующий сигнал; в — ЧМ-сигнал

Подставляя формулу (4.29) в (4.22), запишем ФМ-сигнал как

$$u_{\text{ФМ}}(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_f \cos \Omega t). \quad (4.30)$$

Нетрудно заметить, что ЧМ-сигнал и ФМ-сигнал при однотоновой модуляции очень похожи.

4.3. Сигналы с импульсной и импульсно-кодовой модуляцией

В последние годы в измерительной технике в основном применяются сигналы с импульсной и импульсно-кодовой модуляцией.

Импульсная модуляция

При *импульсной модуляции* (рис. 4.11) в качестве несущего колебания (точнее, поднесущего) используются различные периодические импульсные последовательности, в один из параметров которых вводится измерительная информация. Для дискретных сигналов процесс модуляции принято называть *манипуляцией* параметров импульсов.

Пусть поднесущим колебанием является периодическая последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой U_n , длительностью τ_n и периодом повторения T (рис. 4.11, а). Для наглядности и упрощения математических выкладок выберем в качестве модулирующего сигнала гармоническое колебание $e(t) = E_0 \cos \Omega t$, у которого начальная фаза $\theta_0 = 90^\circ$ (рис. 4.11, б).

Импульсную модуляцию в зависимости от выбора изменяемого параметра модулируемой последовательности делят на:

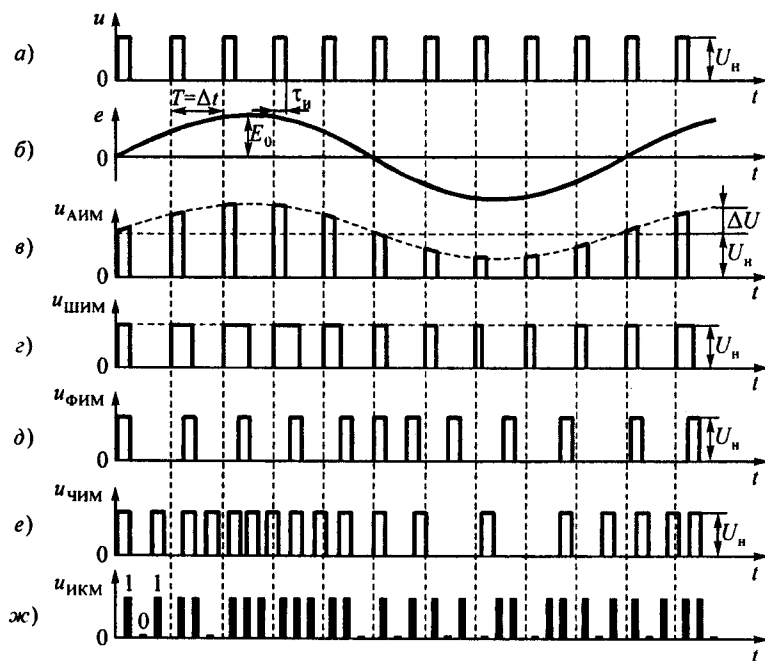


Рис. 4.11. Импульсная модуляция:

а — последовательность исходных импульсов; *б* — модулирующий сигнал;
в — АИМ; *г* — ШИМ; *д* — ФИМ; *е* — ЧИМ; *ж* — ИКМ

- **амплитудно-импульсную (АИМ)**, когда по закону измерительной информации изменяется амплитуда импульсов исходной последовательности (рис. 4.11, *в*);

- **широтно-импульсную (ШИМ)**, при изменении по закону измерительной информации длительности (ширины) импульсов исходной последовательности (рис. 4.11, *г*);

- **фазоимпульсную (ФИМ)**, или **временнóе импульсную (ВИМ)**, если по закону измерительной информации изменяется временнóе положение импульсов (рис. 4.11, *д*);

- **частотно-импульсную модуляцию (ЧИМ)**, при изменении по закону измерительной информации частоты следования импульсов поднесущей (рис. 4.11, *е*);

- **импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)**, при которой первичный сигнал превращается в цифровой код — последовательность импульсов (1 — «единиц») и пауз (0 — «нулей»), имеющих одинаковую длительность. Этот вид модуляции (рис. 4.11, *ж*) наиболее широко применяется в современной измерительной технике.

Импульсно-кодовая (цифровая) модуляция

Можно получить еще три вида импульсно-кодовой (цифровой) модуляции несущего: модуляцию по амплитуде (ИКМ-АМ, или цифровую амплитудную модуляцию — ЦАМ), частоте (ИКМ-ЧМ, или цифровую частотную модуляцию — ЦЧМ) и по фазе (ИКМ-ФМ, или цифровую фазовую модуляцию — ЦФМ). На рис. 4.12 приведены формы сигнала при двоичном коде для различных видов дискретной или цифровой модуляции.

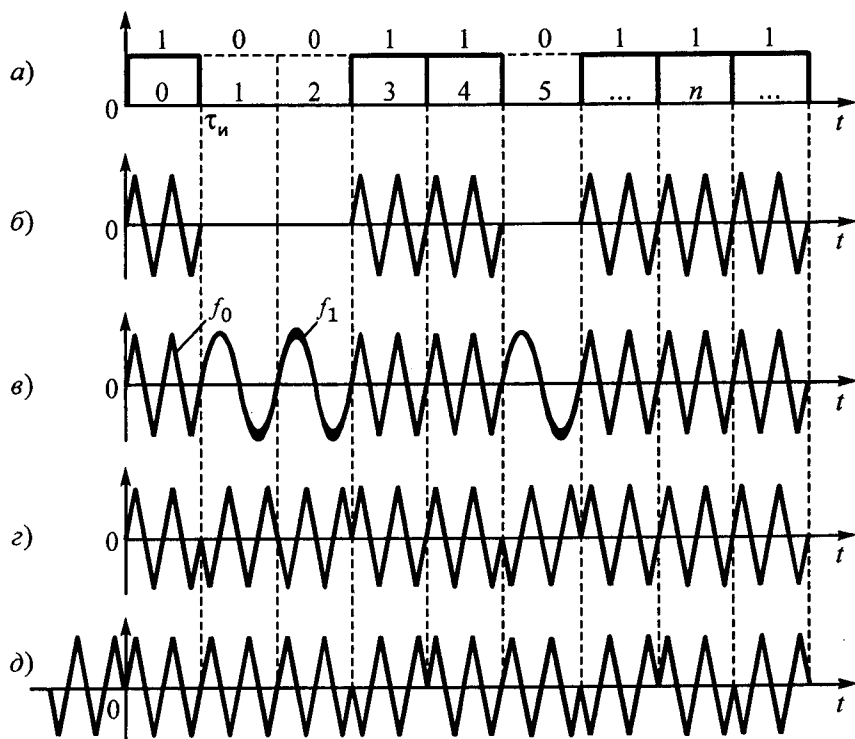


Рис. 4.12. Виды цифровой модуляции двоичным кодом:
а — код; б — ИКМ-АМ; в — ИКМ-ЧМ; г — ИКМ-ФМ; д — ОФМ

Символу «1» при ИКМ-АМ (рис. 4.12, а, б) соответствует передача несущего колебания в течение интервала времени τ_n (посылка), символу «0» — отсутствие колебания (пауза) на таком же временном интервале. В случае ИКМ-ЧМ (рис. 4.12, в) передача несущего колебания с частотой f_0 соответствует символу «1», а передача колебания с частотой f_1 соответствует «0». При двоичной ИКМ-ФМ (рис. 4.12, г) меняется фаза несущей на 180° при каждом переходе от «1» к «0» и от «0» к «1».

На практике широко применяют дискретную систему *относительной фазовой модуляции* (ОФМ). В отличие от ИКМ–ФМ, при ОФМ (рис. 4.12, д) фазу канального сигнала отсчитывают не от некоторого эталона, а от фазы предыдущего элемента сигнала. Например, символ «0» передается отрезком синусоиды с начальной фазой предшествующего элемента сигнала, а символ «1» — таким же отрезком с начальной фазой, отличающейся от начальной фазы предшествующего элемента сигнала на 180° . При ОФМ передача начинается с посылки одного не несущего информации элемента, который служит опорным сигналом для сравнения фазы последующего элемента.

Как правило, в технике измерений используются двоичные коды ($m = 2$) и поэтому $\Delta t = \tau_n$ (рис. 4.12, а).

4.4. Основные сведения об импульсной и цифровой технике измерений

Импульсное и цифровое представление информационных сигналов широко применяют в измерительной технике. При этом аналоговый сигнал, отражающий параметры реального физического процесса, преобразуется в последовательность импульсных сигналов, пригодных для обработки цифровыми устройствами.

Напомним, что устройства, преобразующие аналоговый сигнал в импульсный (цифровой) вид, называются *аналого-цифровыми преобразователями* (АЦП), а устройства обратного преобразования — *цифроаналоговыми преобразователями* (ЦАП).

Исходной предпосылкой возможности построения цифровых измерительных приборов, и в частности АЦП и ЦАП, служит известная в радиотехнике *теорема Котельникова (теорема отсчетов)*. Согласно одной, наиболее известной интерпретации теоремы Котельникова, *произвольный сигнал $u(t)$, спектр которого ограничен некоторой верхней частотой F_v , может быть полностью восстановлен по последовательности своих отсчетных значений, следующих с интервалом времени*

$$\Delta t = \frac{1}{2F_v}. \quad (4.31)$$

При переходе от аналогового (непрерывного) сигнала к цифровому осуществляются три специфических преобразования (рис. 4.13): *дискретизация по времени, квантование по уровню амплитуд и кодирование (оцифровка)*. Такое представление сигналов называют аналого-цифровым преобразованием.

Под *дискретизацией* понимают процесс представления (замену) во времени аналогового сигнала дискретной последовательностью *отсчетов (выборок)*, следующих с заданным временным интервалом Δt , и по которым с заданной точностью можно вновь восстановить исходный сигнал. В про-

Для представления дискретных отсчетов цифровыми сигналами (*кодирования*) их предварительно квантуют по уровню напряжения. В процессе квантования весь диапазон возможных изменений амплитуд аналогового сигнала от 0 до $U_{\max}$ (или от $U_{\min}$ до $U_{\max}$ в случае разнополярного сигнала) разбивают на определенное число одинаковых или различных фиксированных уровней напряжения Δ , называемых *шагом квантования* (рис. 4.13, в). При этом каждому фиксированному уровню сигнала $u_k(t)$ присваивают определенное значение в форме условного числа цифрового кода. С точки зрения удобства технической реализации и обработки обычно используют двоичные цифровые коды, составленные из n (n — целое число) разрядов, каждый из которых представлен «1» — импульсом или «0» — паузой. Общее число уровней квантования составляет 2^n . Уровень шага квантования (рис. 4.13, в) связан с количеством разрядов двоичного кода формулой:

$$\Delta = \frac{U_{\max}}{2^n}. \quad (4.32)$$

На рис. 4.13 в качестве примера показано квантование простейшего однополярного аналогового сигнала на $2^n = 2^3 = 8$ (0, 1, 2, ..., 7) уровней, что соответствует трехразрядному коду. На временной оси трехразрядный цифровой код представляется различными комбинациями из трех импульсов и пауз. Каждый из этих импульсов на одном интервале дискретизации сигнала Δt в соответствии с занимаемой позицией, отвечающей разряду 2^2 , 2^1 , 2^0 , имеет множитель 1 или 0. Наличие на данном интервале дискретизации импульсов с тем или иным множителем определяет уровень квантования сигнала. Например, при кодировании значения амплитуды напряжения $u(0) = 7$ каждый разряд имеет множитель 1, чему соответствует присутствие всех трех импульсов на интервале дискретизации — 111. Аналогично значение $u(2\Delta t) = 3$ представлено двоичным кодом 011, т.е. паузой и двумя импульсами. Преобразуемый в цифровую форму аналоговый сигнал может иметь и отрицательное значение. В этом случае максимальному значению отрицательного потенциала сигнала будет соответствовать нулевой двоичный код, т.е. 000.

В цифровой технике для отражения измерительной информации используются *кодовые слова*. Как правило, информация (кодовые слова) представляется импульсными сигналами прямоугольной формы, имеющими два фиксированных уровня напряжения 1 и 0. Таким образом, кодовое слово в цифровой технике имеет вид последовательности символов 1 и 0 определенной длины, например 10110110.

Теоретической базой построения систем цифровой обработки информации являются *дискретная математика и алгебра логики Буля*. В основе алгебры логики лежат несколько *аксиом и законов* и три элементарные операции: ИЛИ (*логическое сложение*, или *дизъюнкция*), И (*логическое умножение*, или *конъюнкция*), НЕ (*логическое отрицание*, или *инверсия*).

4.5. Логические и цифровые элементы

Все возможные операции над логическими переменными выполняются логическими элементами.

Логические элементы

Логический элемент ИЛИ имеет два или более входов $X_1, X_2, \dots$ и один выход Y (рис. 4.14, а).

Операция дизъюнкции для двух переменных имеет вид:

$$Y = X_1 + X_2. \quad (4.33)$$

Рассмотрим простейшую (для облегчения анализа), диодную реализацию двухвходового элемента ИЛИ (рис. 4.14, б). Если единичный уровень напря-

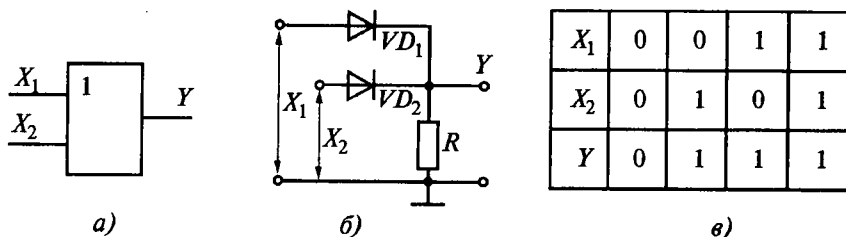


Рис. 4.14. Логический элемент ИЛИ:

a — условное обозначение; b — диодная реализация; c — таблица истинности

жения (логическая 1) присутствует или на первом X_1 , или на втором X_2 , или на обоих входах, то через открытые диоды VD_1 или VD_2 это напряжение передается на выход, создавая единичный уровень выходного напряжения. При нулевых входных напряжениях (отсутствии сигнала) диоды окажутся закрытыми, и на выходе элемента будет иметь место нулевой уровень напряжения.

В классической математике для задания функции обычно используют два способа: аналитический (в виде формулы) и табличный. Подобными же способами можно задавать и логические функции. Наибольшее распространение получило представление логических функций в виде таблиц, называемых *таблицами состояний* или *таблицами истинности*, в которых приводятся все возможные сочетания аргументов и соответствующие им значения логической функции. В соответствии с этим логическому элементу отвечает *таблица истинности*, показанная на рис. 4.14, c .

Логический элемент И (логическая схема совпадения) содержит два или более входов $X_1, X_2, \dots$ и один выход Y (рис. 4.15, a). Представленный в обозначении элемента символ $\&$ (*and* — читается «энд», т. е. И) отражает операцию конъюнкции для двух переменных и определяется следующим выражением:

$$Y = X_1 \cdot X_2. \quad (4.34)$$

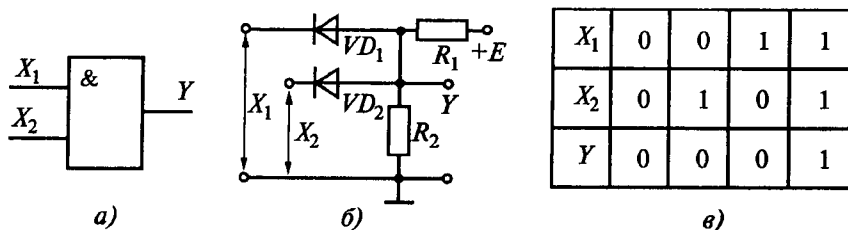


Рис. 4.15. Логический элемент И:

a — условное обозначение; b — диодная реализация; c — таблица истинности

Обратимся к элементарной, двухвходовой диодной реализации элемента И (рис. 4.15, б). Если любое из входных напряжений равно нулю, то катод соответствующего диода замкнут на корпус и выходное напряжение также равно нулю. Напряжение на выходе появится, если высокое напряжение, запирающее диоды, будет подано одновременно и на первый, и на второй входы ($X_1 = 1, X_2 = 1$). В этом случае оба диода в схеме будут закрыты, и через резисторы R_1 и R_2 потечет ток, который создаст на резисторе R_2 высокое выходное напряжение (сигнал $Y = 1$). Таблица истинности элемента И показана на рис. 4.15, в.

Логический элемент НЕ (инвертор) выполняет операцию инверсии, т. е. инвертирует входную логическую величину в соответствии с формулой

$$Y = \bar{X}. \quad (4.35)$$

Словами данная операция трактуется как «изрек равен не иксу», или «изрек равен иксу под чертой».

В условном обозначении элемента НЕ (рис. 4.16, а) операция инверсии отражена кружком на выходе схемы. Работу элемента НЕ иллюстрирует таблица истинности на рис. 4.16, б. Операцию инверсии выполняют электронные ключи — транзисторные усилители.

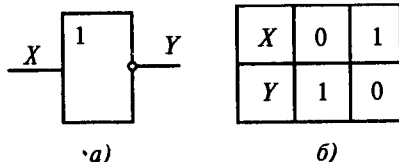


Рис. 4.16. Элемент НЕ:
а — условное обозначение;
б — таблица истинности

В практических схемах цифровой измерительной техники применяются две базовые схемы логических элементов и их модификации. В них используются сочетания цифровых логических элементов ИЛИ и И с инвертором НЕ.

Элемент ИЛИ–НЕ (рис. 4.17, а) осуществляет логическое сложение двух (и более) цифровых сигналов с инверсией результата:

$$Y = \overline{X_1 + X_2}. \quad (4.36)$$

Элемент И–НЕ (рис. 4.17, б) производит логическое умножение двух (и более) цифровых сигналов с инверсией результата:

$$Y = \overline{X_1 \cdot X_2}. \quad (4.37)$$

Таблицы истинности элементов ИЛИ–НЕ и И–НЕ приведены соответственно на рис. 4.17, в и г.

Базовые схемы можно также использовать для построения логических элементов. Так, объединение входов схемы И–НЕ превращают ее в инвертор.

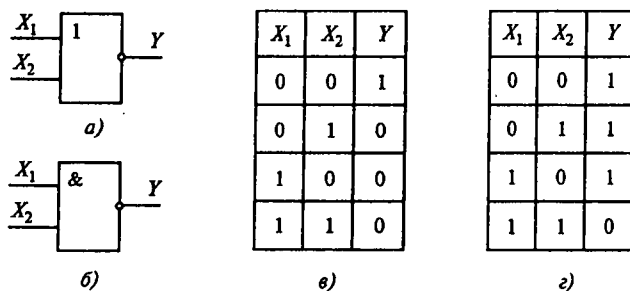


Рис. 4.17. Базовые элементы:

а — ИЛИ-НЕ; б — И-НЕ; в, г — соответствующие им таблицы истинности

Наличие усилительного элемента в схемах И-НЕ и ИЛИ-НЕ позволяет сохранять высокий потенциал напряжения сигнала (логическую 1) в процессе его передачи при последовательном многократном соединении этих устройств.

Триггеры

Триггер, или *бистабильная (двустабильная) полупроводниковая ячейка*, — устройство с двумя устойчивыми состояниями, скачком переходящее из одного состояния в другое под воздействием входных сигналов. Наименование смены состояний триггера имеет ряд синонимов: *переброс, переключение, опрокидывание*.

Основное назначение триггера — *запоминание (хранение)* цифровой информации. Приняв одно состояние за 1, а другое — за 0, считают, что триггер хранит разряд числа в двоичном коде. Хранение цифровой информации в такой схеме теоретически может продолжаться сколь угодно долго, пока на триггер не поступят сигналы управления или с него не будет снято напряжение питания.

Структурно *интегральные триггеры* состоят из собственно *триггера* и схемы управления его входами (*входной логики*). В зависимости от принципа построения входной логики получают триггеры с разными функциональными возможностями: триггеры *RS, D, T, JK* (читается как «жи-ка») и др.

По способу управления триггеры делятся на *асинхронные* и *синхронные (тактируемые)*. Переключение асинхронных триггеров происходит с поступлением входного сигнала на *информационный вход*. Синхронные триггеры имеют дополнительный *тактовый вход C* (*C — clock — фиксация времени*), и их опрокидывание происходит только при поступлении входного сигнала и обязательном наличии *тактового импульса*.

Различают *однотактные* (обозначение *T*) и *двухтактные*, или *двухступенчатые* (обозначение *ТТ*) триггеры. Однотактные триггеры переключаются по переднему фронту тактового импульса, а двухтактные — по его задне-

му фронту. Триггеры имеют два взаимоинверсных выхода: *прямой* Q и *инверсный* $\bar{Q}$ (читается как «не ку», «ку под чертой»). Триггер находится в единичном состоянии, когда $Q = 1$, $\bar{Q} = 0$, и в нулевом, когда $Q = 0$, $\bar{Q} = 1$.

RS-триггер — на рис. 4.18 показана логическая схема, условное обозначение и таблица истинности RS-триггера, выполненного на логических элементах ИЛИ—НЕ. Этот триггер имеет два информационных входа R и S .

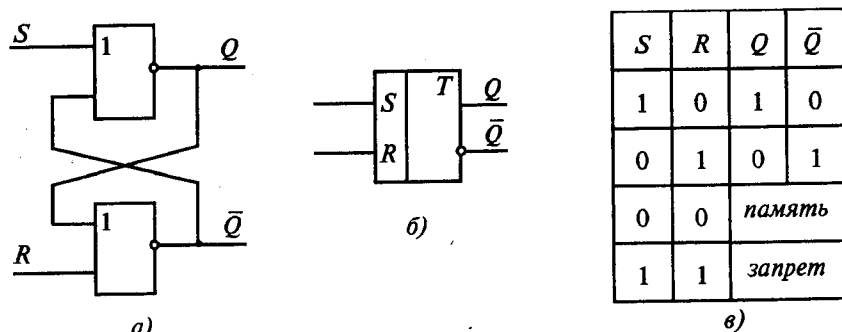


Рис. 4.18. RS-триггер с прямыми входами:
а — схема; б — условное обозначение; в — таблица истинности

Вход, по которому триггер устанавливается в единичное состояние, называют входом S (от англ. *set* — установка), а в нулевое — входом R (*reset* — сброс). Если $S = 1$, $R = 0$, то триггер переходит в *единичное состояние*; при $S = 0$, $R = 1$ — в *нулевое состояние*. При установке на входах логических нулей ($S = 0$, $R = 0$) триггер сохраняет предыдущее состояние. Такую комбинацию входных сигналов называют *нейтральной*, или *памятью*.

Если на входы одновременно поступают единичные сигналы ($S = 1$, $R = 1$), то на обоих выходах появляются логические нули $Q = 0$, $\bar{Q} = 0$, и триггер утрачивает свои свойства, поскольку под воздействием внутренних факторов он может равновероятно перейти как в единичное, так и в нулевое состояние. Такая комбинация входных сигналов является *запрещенной* для триггера.

Построенный на элементах ИЛИ—НЕ и переключающийся единичными сигналами RS-триггер, называют *триггером с прямыми входами*.

RS-триггер, выполненный на базовых элементах И—НЕ, — *триггером с инверсными входами*. Чтобы RS-триггер на логических элементах И—НЕ вырабатывал те же сигналы, что и триггер с прямыми входами, необходимо подавать на его входы инверсные сигналы.

D-триггер имеет два входа: информационный D (*delay* — задержка) и тактовый C (рис. 4.19). Запись

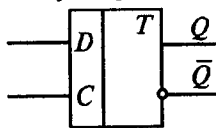


Рис. 4.19. D-триггер

информации в нем производится только в моменты поступления тактовых импульсов на вход C ($C = 1$). В этом случае выходной сигнал Q повторяет входной D : $Q = 1$, если $D = 1$, и $Q = 0$, если $D = 0$.

T-триггер, или *счетный триггер* имеет только один, информационный вход T (рис. 4.20, а), и его переключение происходит в момент поступления очередного входного импульса. Период повторения выходных импульсов T -триггера в два раза больше периода повторения входных импульсов (рис. 4.20, б). Поскольку частота следования выходных импульсов в этом случае уменьшается вдвое, T -триггеры широко используются в *делителях частоты*.

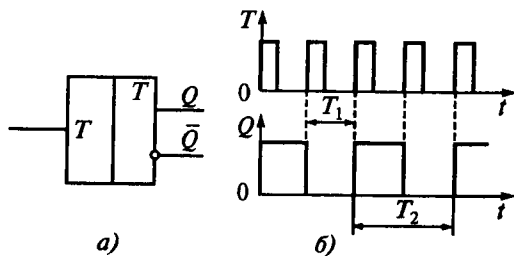


Рис. 4.20. T -триггер:

а — обозначение; б — временные диаграммы

JK-триггер имеет два информационных входа J (*jump* — переброс), K (*keep* — сохранять) и тактовый вход C (рис. 4.21, а). Если сигнал $C = 1$, то JK -триггер функционирует как RS -триггер с прямыми входами, при этом вход J предназначен для установки триггера в состояние 1, а вход K — в состояние 0. Комбинация сигналов $J = K = 1$ не является запрещенной для JK -триггера — в этом случае происходит его опрокидывание. Таблица истинности этого триггера представлена на рис. 4.21, б.

В JK -триггере имеются еще два дополнительных инверсных входа $\bar{S}$ и $\bar{R}$, используемых для его принудительной установки в состояние 1 или 0.

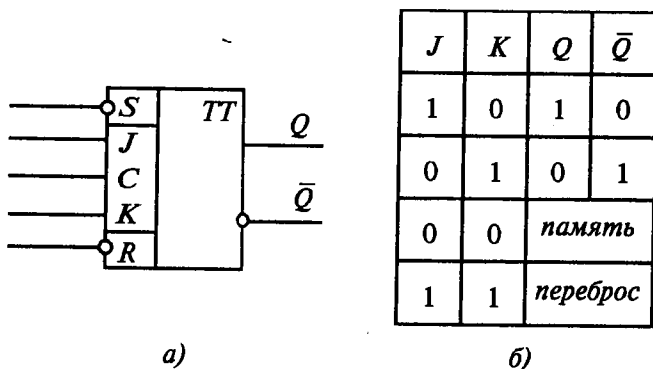


Рис. 4.21. JK -триггер:

а — условное обозначение; б — таблица истинности

При этом состояния входов J , K и C могут быть совершенно произвольны. Если необходимо исключить влияние входов принудительной установки $\bar{S}$ и $\bar{R}$, то на них подают логическую 1, т. е. подсоединяют через ограничивающие токи резисторы к источнику питания микросхемы.

Интегральные счетчики

Интегральный счетчик — цифровое устройство, выполненное на интегральных триггерах со схемами управления разной структуры и осуществляющее счет поступающих на его вход импульсов. Счет импульсов в счетчике представляется определенными комбинациями состояний триггеров. При поступлении на вход схемы очередной логической 1 в счетчике устанавливается новая комбинация состояний триггеров, соответствующая числу, превышающему предыдущее на единицу. Такие счетчики называют *суммирующими*. В цифровой измерительной технике применяют и *вычитающие счетчики*, в которых в процессе счета входные числа последовательно убывают на единицу, а также *реверсивные счетчики*, способные переключаться из режима суммирования в режим вычитания и наоборот.

Для представления чисел в счетчиках используются в основном двоичная, десятичная и двоично-десятичная системы счисления. При применении двоичной системы счисления логические уровни на прямых выходах триггеров определяют цифры двоичных разрядов числа. В этом случае каждый разряд числа в счетчике обеспечивается определенным состоянием одного триггера. Максимальное число записываемых импульсов составляет $N = 2^n - 1$, где n — число разрядов (число триггеров) в счетчике.

Рассмотрим простейший *двоичный кольцевой счетчик*, представляющий собой три замкнутых в кольцо JK -триггеров (рис. 4.22, а), по которым под

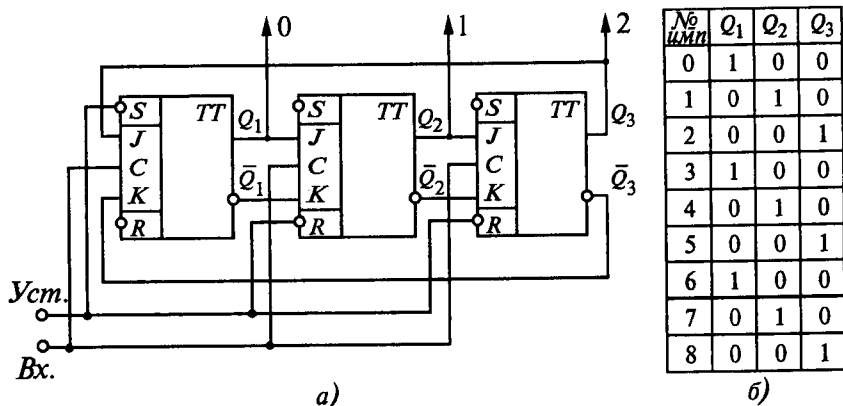


Рис. 4.22. Кольцевой счетчик:
а — схема; б — таблица истинности

воздействием входных импульсов (точка Bx .) циркулирует одна или несколько кодовых единиц. В этой схеме прямой выход каждого предыдущего триггера соединен с входом J последующего триггера. Тактовые входы C всех триггеров объединены (узел Bx .) и на них поступают счетные импульсы. Перед началом счета первый триггер импульсным сигналом $Уст.$ устанавливается в состояние 1 (выход 0), остальные триггеры (выходы 1 и 2) — в состояние 0. Этому состоянию счетчика соответствует 0 на выходе Q_3 последнего триггера. После отключения сигнала $Уст.$ начинается счет и триггеры функционируют как обычные JK -триггеры.

Так как на информационных входах первого триггера было установлено $J = 0$ и $K = 1$, в момент окончания первого входного импульса он перейдет в состояние логического 0. Второй триггер примет состояние 1 (выход 1), так как на его входах было $J = K = 1$. Третий триггер не изменит своего предыдущего состояния. Таким образом, кодовая 1 перешла с первого триггера на второй. По окончании каждого следующего входного импульса, кодовая 1 будет перемещаться от предыдущего триггера к последующему, т. е. переходить по схеме вправо (см. таблицу истинности на рис. 4.22, б).

Шифраторы и дешифраторы

Прежде чем перейти к рассмотрению специфических устройств цифровой измерительной техники — шифраторов и дешифраторов, обратимся к системам отображения цифровой информации.

Системы счисления и коды, применяемые в цифровой измерительной технике. Для изображения любых чисел существует некоторое ограниченное число знаков и порядок их написания — это и есть система счисления. В привычной для нас десятичной системе таких знаков десять: 0, 1, 2, ... , 9. Форма записи числа в десятичной системе счисления имеет вид

$$N = \sum_{i=1}^n a_i 10^{i-1} = a_i 10^{i-1} + a_{i-1} 10^{i-2} + \dots + a_2 10^1 + a_1 10^0, \quad (4.38)$$

где 10^i — десятичный разряд; a_i — значение символа в соответствующем разряде, которое может быть любым от 0 до 9.

Например, число 583 с помощью трех десятичных разрядов запишется как: $N = 583 = 5 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0$.

Аналогично записывается целое число и в двоичной системе счисления:

$$N = \sum_{i=1}^n b_i 2^{i-1} = b_i 2^{i-1} + b_{i-1} 2^{i-2} + \dots + b_2 2^1 + b_1 2^0. \quad (4.39)$$

В этом выражении коэффициенты b_i принимают лишь два значения: 0 и 1.

Например, число 583 в двоичной системе запишется в следующем виде:

$$N = 1 \cdot 2^9 + 0 \cdot 2^8 + 0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Следовательно, числу 583 в десятичной системе соответствует число в двоичной: 1001000111. Последнее принято называть кодом числа в двоичной системе счисления.

Написание числа в двоичном коде оказывается удобным для проведения арифметических действий по законам булевой алгебры, что применяется в микропроцессорной и компьютерной технике.

При использовании десятичной системы счисления для образования кода требуется десять различных импульсов, например, отличающихся амплитудой, длительностью и пр. Такое представление кодов не применяют, так как для образования и его распознавания требуется сложная аппаратура, в то время как для образования и обработки двоичного кода могут быть использованы простые, двоичные элементы, имеющие всего два состояния 1 и 0. Двоичный код наиболее компактен (экономичен) и пока является основным кодом в компьютерной технике.

Однако двоичный код неудобен для управления десятичным цифровым отсчетным устройством измерительной аппаратуры. Поэтому в цифровой измерительной аппаратуре широко используются *двоично-десятичные* и *тетрадно-десятичные* коды, так как представление измеряемой величины на индикаторе должно быть выполнено в привычном для оператора десятичном виде, а перевод двоичного кода в десятичный — сложная для него задача.

В тетрадно-десятичной системе каждая десятичная цифра (0...9) кодируется четырьмя (тетрада — четыре) двоичными числами 0 и 1 при различных весовых коэффициентах.

Наиболее широко распространен в цифровых измерительных приборах код **8421**, в котором весовыми коэффициентами являются цифры 8, 4, 2, 1 (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Двоично-десятичный код 8421

Десятичные цифры	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Код 8421	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001

Если вернуться к числу 583, то в коде 8421 оно будет представлено следующим образом:

$$583 = 10^2 \cdot (8 \cdot 0 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 1) + 10^1 \cdot (8 \cdot 1 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 0) + 10^0 \cdot (8 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1).$$

Соответственно тетрадно-десятичная запись имеет вид

0101 1000 0011.

Помимо двоично-десятичного кода при построении цифровых измерительных приборов применяются коды и с другими весовыми коэффициентами (тетрадно-десятичные коды), например: 4 2 2 1 и др. Эти коды неодно-

значные (т.е. числа можно получить разными комбинациями), но требуют меньше символов, что иногда важно. Для устранения неоднозначности принимают специальные меры.

В широко используемых в цифровой измерительной технике десятичных (декадных) счетчиках цифры разрядов десятичного числа представляются в четырехразрядной двоичной форме, т. е. используется двоично-десятичная система исчисления. При этом для каждого разряда десятичного числа используется четыре триггера и, если число десятичных разрядов k , то для регистрации чисел в десятичном счетчике необходимо задействовать $4k$ триггеров. Максимальное число записанных импульсов в счетчике в этом случае составляет $N = 10^k - 1$. Десятичные счетчики широко применяют в случаях, когда число поступающих импульсов необходимо представить в привычной для человека десятичной системе счисления.

Шифратор

Шифратор (называемый часто *кодером*) — устройство, преобразующее десятичные числа в двоичную систему счисления. Пусть в шифраторе имеется m входов, последовательно пронумерованных десятичными числами (0, 1, 2, 3, ..., $m - 1$), и n выходов. Поступление сигнала на один из входов вызывает появление на выходах n -разрядного двоичного числа, соответствующего номеру возбужденного входа.

Известно, что построить шифраторы с большим числом входов m технически трудно, поэтому они используются для преобразования в двоичную систему счисления небольших десятичных чисел. Для преобразования больших десятичных чисел используются специальные методы. Шифраторы часто снабжаются клавиатурой, каждая клавиша которой связана с определенным входом шифратора, и на его выходе воспроизводится двоичное число, соответствующее написанному на клавише символу.

На рис. 4.23 показано условное изображение шифратора, преобразующего первые десять цифр десятичного счисления 0, 1, 2, ..., 9 в двоичное представление. Символ *CD* в обозначении шифратора образован из букв, входящих в английское слово *CODER*. Слева на схеме показано десять входов, обозначенных соответствующими десятичными числами. Справа представлены выходы шифратора: цифрами 1, 2, 4, 8 обозначены весовые коэффициенты двоичных разрядов, соответствующих отдельным выходам.

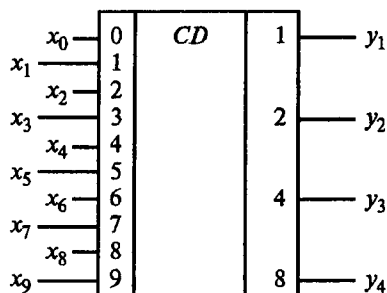


Рис. 4.23. Условное изображение шифратора

Дешифратор

Дешифратор (называемый также *декодером*) предназначен для обратного преобразования двоичных чисел в сравнительно небольшие по значению десятичные числа. Входы дешифратора служат для подачи двоичных чисел, выходы последовательно нумеруются десятичными числами. Дешифраторы широко используются в цифровой измерительной технике. В частности, их применяют в устройствах, печатающих на бумаге выводимые из цифровой схемы текст или числа. В таких устройствах двоичное число, поступаая на соответствующий вход дешифратора, вызывает появление сигнала на его определенном выходе.

На рис. 4.24 в качестве примера приведено условное изображение одной из простейших структурных схем дешифратора. Символ *DC* образован из букв английского слова *DECODER*.

Слева от схемы представлены входы шифратора: цифрами 1, 2, 4, 8 обозначены весовые коэффициенты двоичных разрядов. Справа показаны десять выходов, пронумерованных десятичными числами, соответствующими отдельным комбинациям входного двоичного числа. На каждом выходе дешифратора при строго определенной комбинации входного двоичного кода вырабатывается десятичная цифра.

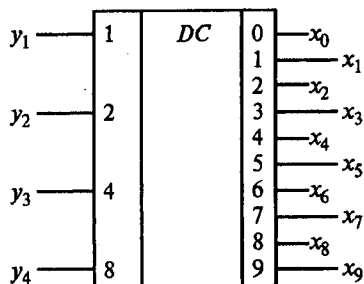


Рис. 4.24. Условное изображение дешифратора

4.6. Цифровые измерительные приборы и преобразователи

Цифровые измерительные приборы автоматически преобразуют входной измерительный сигнал в дискретный выходной сигнал, представленный в цифровой форме.

По виду измеряемых величин ЦИП делятся на:

- вольтметры и амперметры постоянного и переменного тока;
- омметры и мосты постоянного и переменного тока;
- комбинированные приборы;
- измерители частоты, интервалов времени и фазового сдвига;
- специализированные приборы, предназначенные для определения времени срабатывания различных элементов и т. д.

Диапазон измеряемых посредством ЦИП величин обычно весьма широкий и разбивается на ряд поддиапазонов. Выбор нужного поддиапазона в процессе измерения производится вручную или автоматически. Измерение на выбранном поддиапазоне всегда осуществляется автоматически.

Основными классификационными признаками ЦИП принято считать вид измеряемой физической величины и способ преобразования, определяющие такие важные характеристики, как точность и быстродействие. По виду входных физических величин ЦИП объединяют в следующие основные группы приборов для измерения:

- постоянного и переменного тока (напряжения);
- параметров R , L и C электрических цепей;
- временных параметров (частоты, периода, интервала времени, фазы).

Разновидностями ЦИП, входящих в упомянутые группы, являются средства измерений с микропроцессорами, цифровые осциллографы и виртуальные приборы на основе компьютеров и плат сбора данных.

Важными техническими характеристиками ЦИП, определяющими возможность их использования для конкретной измерительной задачи, являются: пределы измерения, цена деления, входное сопротивление, быстродействие, точность, помехоустойчивость и надежность.

Обобщенная структурная схема ЦИП показана на рис. 4.25.

В цифровом приборе измеряемая величина x подается на входное устройство (ВУ), предназначенное для выделения ее из помех и масштабного преобразования. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует выходную величину ВУ x' в код N , который подается на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ), где индицируется в виде ряда десятичных цифр. Цифровые коды могут выводиться и во внешние устройства, например в компьютер для дальнейшей обработки или хранения. Управляет работой ЦИП устройство управления (УУ) путем выработки и подачи определенной последовательности командных сигналов во все функциональные узлы прибора.

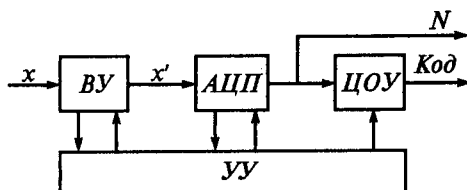


Рис. 4.25. Обобщенная структурная схема ЦИП

ВУ x' в код N , который подается на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ), где индицируется в виде ряда десятичных цифр. Цифровые коды могут выводиться и во внешние устройства, например в компьютер для дальнейшей обработки или хранения. Управляет работой ЦИП устройство управления (УУ) путем выработки и подачи определенной последовательности командных сигналов во все функциональные узлы прибора.

По способу преобразования входного сигнала ЦИП условно делят на приборы *прямого* и *уравновешивающего преобразования*. В ЦИП прямого преобразования отсутствует цепь общей отрицательной обратной связи (т.е. отрицательная связь выхода с входом). Они обладают повышенным быстродействием, но прецизионные измерения возможны лишь при высокой точности всех измерительных преобразователей, поэтому применяются редко. ЦИП уравновешивающего преобразования охвачен цепью общей обратной связи. Схема цепи отрицательной обратной связи представляет собой по существу цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) выходного дискретного сигнала в компенсирующую

величину x_k , имеющую одну физическую природу с измеряемой величиной $x(t)$.

Погрешность ЦИП уравнивающего преобразования, охваченных отрицательной обратной связью, практически не зависит от погрешностей преобразователей цепи прямого преобразования, а определяется в основном параметрами ЦАП.

По характеру изменения во времени компенсирующей величины x_k ЦИП делят на приборы *развертывающего* и *следающего уравнивания*. Примером ЦИП первого типа являются приборы, в которых значение компенсирующей величины x_k в каждом цикле измерения возрастает от нуля ступенями, равными шагу квантования Δ (рис. 4.26, а).

Когда $x_k = x$, процесс уравнивания прекращается и фиксируется результат измерения, равный числу ступеней квантования компенсирующей величины. Отсчет показаний производится в конце цикла изменения величины x_k . При этом возникает динамическая погрешность Δ_d , обусловленная изменением измеряемой величины $x(t)$ за интервал времени между моментами уравнивания и отсчета.

В ЦИП следающего уравнивания (рис. 4.26, б) уровень компенсирующей величины не возвращается к нулю после достижения равенства с измеряемой величиной, а остается постоянным до начала следующего цикла. При изменении x величина x_k соответственно отслеживает это изменение так, что разность $x - x_k$ не превышает шага квантования. Отсчет проводится или в момент уравнивания, или по внешним командам. Следающее уравнивание сложнее в технической реализации, но при прочих равных условиях дает меньшую динамическую погрешность, не превышающую шага квантования.

По виду выходного дискретного сигнала ЦИП и АЦП делятся на приборы с двоичной, десятичной и двоично-десятичной формами представления информации. Двоичная форма является самой экономичной и используется в основном для представления информации в системных АЦП.

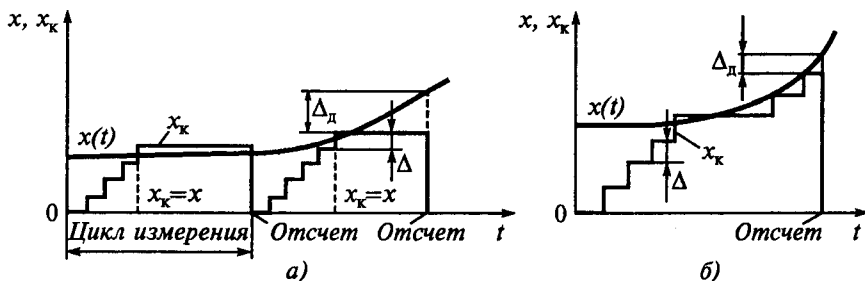


Рис. 4.26. Временные диаграммы к схемам ЦИП уравнивающего типа:
а — развертывающего; б — следающего

4.7. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи

Прежде чем перейти к анализу принципа действия АЦП и ЦАП, коротко рассмотрим важнейший элемент интегральной техники — операционный усилитель и ряд схем, построенных на нем.

Операционный усилитель

Операционным усилителем (ОУ) называют высококачественный интегральный линейный усилитель напряжения, имеющий большой коэффициент усиления ($10^6 \dots 10^7$), высокое входное (сотни МОм) и малое выходное (единицы Ом) сопротивления. На рис. 4.27, а показано условное графическое обозначение ОУ.

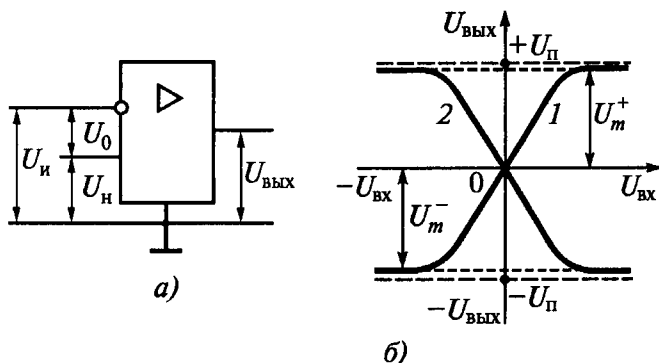


Рис. 4.27. Операционный усилитель:

а — условное графическое обозначение; б — передаточные характеристики

По отношению к выходу один из входов ОУ является *неинвертирующим* $U_{\text{н}}$, а другой — *инвертирующим* $U_{\text{и}}$; последний обозначается знаком *инверсии* (кружок на входе ОУ). Питание ОУ осуществляется от двух одинаковых разнополярных источников $+U_{\text{п}}$ и $-U_{\text{п}}$. При таком питании входные и выходные сигналы могут быть двуполярными, а нулевым входным сигналам соответствует нулевой выходной сигнал. Выходной сигнал ОУ пропорционален дифференциальному входному сигналу — разности входных $U_0 = U_{\text{н}} - U_{\text{и}}$.

Коэффициент усиления по напряжению K_0 ОУ равен отношению выходного напряжения к дифференциальному входному напряжению:

$$K_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_0}. \quad (4.40)$$

Передаточные характеристики — зависимость выходного напряжения от входного (рис. 4.26, б) — имеют важное значение для ОУ. Если усиливаемый сигнал подан на неинвертирующий вход, а инвертирующий вход заземлен, то знак выходного напряжения совпадает со знаком входного напряжения (ли-

ния 1). При подаче сигнала на инвертирующий вход и заземлении неинвертирующего, знак выходного напряжения будет противоположен знаку входного (линия 2). Угол наклона линейных участков передаточных характеристик пропорционален коэффициенту усиления по напряжению K_0 . Горизонтальные участки передаточных характеристик соответствуют режиму насыщения оконечных транзисторов ОУ, поэтому выходное напряжение: $\pm U_{\text{вых}} = U_m^{\pm} \approx \pm U_{\text{п}}$.

С целью упрощения анализа и расчета схем на операционных усилителях вводят понятие «идеальный» ОУ, для которого справедливы следующие допущения: бесконечно большой коэффициент усиления $K_0 = \infty$, входное сопротивление $R_{\text{вх}0} = \infty$ и нулевое выходное сопротивление $R_{\text{вых}0} = 0$.

Из этих допущений вытекают два основных свойства (правила анализа) ОУ.

1. Дифференциальный входной сигнал равен нулю

$$U_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{K_0} = \frac{U_{\text{вых}}}{\infty} = 0. \quad (4.41)$$

2. Входы ОУ не потребляют ток от источника входного сигнала:

$$I_0 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}0}} = \frac{U_{\text{вх}}}{\infty} = 0. \quad (4.42)$$

Понятие идеального ОУ соответствует так называемому принципу «*виртуального*» (кажущегося) замыкания его инвертирующего и неинвертирующего входов. При виртуальном замыкании, как и при физическом, напряжение между соединенными зажимами равно нулю. Однако в отличие от физического замыкания, ток между виртуально замкнутыми зажимами не течет. Иначе говоря, для тока виртуальное замыкание зажимов эквивалентно разрыву электрической цепи.

В зависимости от условий подачи сигнала на входы ОУ и подключения к нему внешних элементов можно получить две фундаментальные схемы включения: *инвертирующую* и *неинвертирующую*.

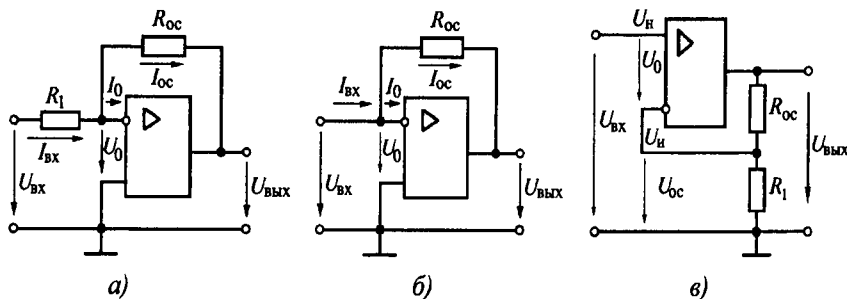


Рис. 4.28. Усилители на ОУ:

а — инвертирующий; б — преобразователь тока в напряжение; в — неинвертирующий

Инвертирующий усилитель. В схеме инвертирующего усилителя (рис. 4.28, а) входное напряжение через резистор R_1 подается на инвертирующий вход, который с помощью резистора *обратной связи* R_{oc} охвачен параллельной *отрицательной обратной связью* (ООС) по напряжению. Неинвертирующий вход усилительного каскада заземлен.

Для определения параметров инвертирующего усилителя воспользуемся первым законом Кирхгофа для токов инвертирующего входа: $I_{вх} = I_0 + I_{oc}$. Поскольку по второму свойству идеального ОУ ток $I_0 = 0$, то $I_{вх} = I_{oc}$. Выразив токи через соответствующие им входные напряжения, получим:

$$\frac{U_{вх} - U_0}{R_1} = \frac{U_0 - U_{вых}}{R_{oc}}.$$

По первому свойству идеального ОУ $U_0 = 0$, и $U_{вх}/R_1 = -U_{вых}/R_{oc}$. Тогда коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K_{и} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{oc}}{R_1}. \quad (4.43)$$

Согласно формуле (4.43), изменением значения сопротивления обратной связи R_{oc} можно регулировать коэффициент усиления инвертирующего усилителя.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя существенно меньше собственного входного сопротивления ОУ. Можно показать, что входное и выходное сопротивления инвертирующего усилителя:

$$R_{вх и} = \frac{U_{вх} - U_0}{I_{вх}} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = R_1; \quad R_{вых и} = \frac{K_{и}}{K_0} R_{вых 0}. \quad (4.44)$$

Отметим, что при $R_1 = R_{oc}$, $K_{и} = -1$ схема рис. 4.28, а превращается в инвертирующий повторитель (*инвертор*).

Инвертирующий усилитель можно превратить в *преобразователь тока в напряжение* (рис. 4.28, б). Это будет при $R_1 = 0$. Тогда ток $I_{вх} = I_{oc} = -U_{вых}/R_{oc}$ и выходное напряжение $U_{вых} = -I_{вх}R_{oc}$.

Неинвертирующий усилитель. В неинвертирующем усилителе входной сигнал поступает на неинвертирующий вход, а инвертирующий с помощью резистивного делителя R_1 , R_{oc} охвачен последовательной ООС по напряжению (рис. 4.28, в). В этой схеме напряжение $U_{вх} = U_0 + U_{oc}$. Так как $U_0 = 0$, то $U_{вх} = U_{oc} = U_{вых}R_1/(R_1 + R_{oc})$. Отсюда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_{н} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1}. \quad (4.45)$$

Известно, что входное сопротивление неинвертирующего усилителя велико и равно входному сопротивлению ОУ по неинвертирующему входу, а выходное сопротивление близко к нулю.

Если сопротивление обратной связи $R_{oc} = 0$, то $U_{вых} = U_{вх}$, и неинвертирующий усилитель превращается в повторитель напряжения, который используют для гальванической развязки различных схем.

Компаратор — устройство, осуществляющее сравнение двух аналоговых напряжений. В простейшей схеме компаратора входное напряжение сравнивается с некоторым опорным, в качестве которого используется часть выходного напряжения (рис. 4.29, а).

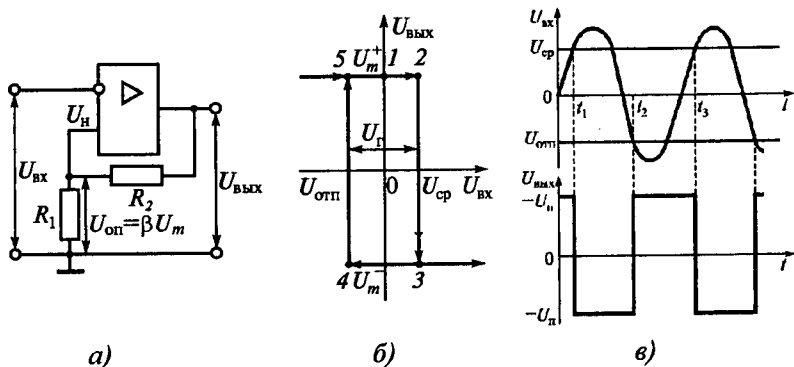


Рис. 4.29. Компаратор:
а — схема; б — передаточная характеристика;
в — формирование меандра из синусоиды компаратором

На инвертирующий вход ОУ подается входное напряжение, а на неинвертирующий вход — снимаемое с делителя R_1, R_2 опорное напряжение $U_n = U_{оп} = \beta U_m$, где $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ — коэффициент передачи резистивной цепи R_1, R_2 положительной ОС. Таким образом, ОУ охвачен положительной обратной связью по неинвертирующему входу, и выходное напряжение скачком изменяет свою полярность при сравнении входного и опорного напряжений.

Принцип действия компаратора рассмотрим с помощью передаточной характеристики — зависимости выходного напряжения от входного (рис. 4.29, б). Пусть входное напряжение $U_{вх} = 0$, а выходное $U_{вых} = U_m^+$ (точка 1 на рис. 4.29, б). Напряжение на неинвертирующем входе при этом будет: $U_n = \beta U_m^+$.

Если входное напряжение больше нуля и увеличивается, то при сравнении его амплитуды с опорным, равным напряжению срабатывания $U_{сп} = \beta U_m^+$, компаратор переключается. При этом произойдет скачкообразное изменение выходного напряжения со значения U_m^+ на значение U_m^- (переход от точки 2 к точке 3 на рис. 4.29, б). Дальнейшее увеличение входного напряжения не изменит состояния компаратора, и напряжение на неинвертирующем входе

ОУ будет также постоянным: $U_n = \beta U_m^-$. При уменьшении входного напряжения до уровня опорного, равного напряжению отпущения $U_{вх} = U_{отп} = \beta U_m^-$, произойдет скачкообразный возврат компаратора в исходное состояние. Выходное напряжение при этом изменится с U_m^- на U_m^+ (переход от точки 4 к точке 5 на рис. 4.29, б).

Таким образом, передаточная характеристика компаратора имеет вид *петли гистерезиса*. Такой компаратор обладает *триггерным* (переключающим) *эффектом*, и его называют триггером Шмитта.

Сумма напряжений срабатывания и отпущения

$$U_r = U_{ср} + U_{отп} = 2\beta U_m \quad (4.46)$$

является *напряжением гистерезиса*. Оно вводится для повышения помехоустойчивости и позволяет устранить «дребезг» триггера, т.е. случайное его переключение новым напряжением помех при отсутствии входного сигнала.

В компараторе амплитуда выходного напряжения практически равна напряжению питания: $U_{вых} = U_m^\pm = \pm U_n$. Компараторы применяют для формирования сигналов прямоугольной формы из различных непрерывных сигналов. В частности, при подаче на компаратор синусоиды (рис. 4.29, в), на его выходе создается симметричное прямоугольное колебание — *меандр*.

Положим, что в момент времени $t = 0$ напряжение на выходе компаратора $U_{вых} = U_m^+$. В таком состоянии компаратор будет находиться, пока амплитуда входного напряжения $U_{вх} < U_{ср}$. В момент времени $t = t_1$ входное напряжение станет $U_{вх} = U_{ср}$, и компаратор переключится. При этом выходное напряжение $U_{вых}$ скачком изменится со значения U_m^+ на значение U_m^- . В момент времени $t = t_2$ входное напряжение станет равным $U_{отп}$, и произойдет новое переключение компаратора.

Цифроаналоговые преобразователи

Принцип действия четырехразрядного ЦАП иллюстрируется с помощью простейшей схемы на ОУ, представленной на рис. 4.30. Основу схемы составляет матрица резисторов с источником постоянного напряжения, соединенных с инвертирующим входом ОУ ключами, которые управляются двоичным кодом (например, выходным кодом счетчика).

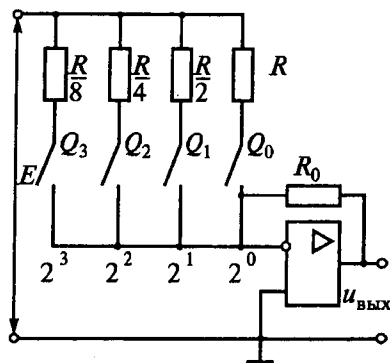


Рис. 4.30. Четырехразрядный ЦАП

В зависимости от поступающего на схему кода цифрового сигнала к усилителю подключаются резисторы с различными номиналами сопротивлений. В схеме ключи замыкаются только при поступлении на них команд, соответствующих логической единице. Коэффициенты усиления инвертирующего усилителя по входам 2^0 , 2^1 , 2^2 и 2^3 соответственно равны:

$$K_0 = -R_0 Q_0 / R; \quad K_1 = -2R_0 Q_1 / R; \quad K_2 = -4R_0 Q_2 / R; \quad K_3 = -8R_0 Q_3 / R. \quad (4.47)$$

Здесь Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 — кодовые числа, принимающие два значения: либо 1 (ключ замкнут), либо 0 (ключ разомкнут).

Из формулы (4.47) следует, что четырехразрядный двоичный код преобразуется в выходное напряжение, изменяющееся по амплитуде от 0 до 15Δ (напомним, что Δ — шаг квантования). Например, двоичному числу 1001 соответствует напряжение $u_{\text{вых1}} = \Delta(8 \cdot 1 + 4 \cdot 0 + \dots + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 1) = 9\Delta$, а числу 1100 — $u_{\text{вых2}} = 12\Delta$. Поскольку на вход резистивной матрицы подается постоянное напряжение E , то выходное напряжение ЦАП изменяется скачками при переключении кода цифрового сигнала. Сглаживание выходного сигнала осуществляется *фильтром низкой частоты* (ФНЧ).

Аналого-цифровые преобразователи

По своей структуре аналого-цифровые преобразователи (АЦП) более сложны, чем ЦАП, причем последние часто являются основным узлом АЦП. В настоящее время существуют три различных метода построения схем АЦП: последовательный, параллельный и последовательно-параллельный.

Последовательный (последовательного счета) метод построения АЦП (рис. 4.31) основан на подсчете числа суммирований опорного напряжения младшего разряда, необходимого для получения напряжения, равного входному. При этом k -разрядный двоичный код одного отсчета определяется в схеме за 2^k интервалов дискретизации.

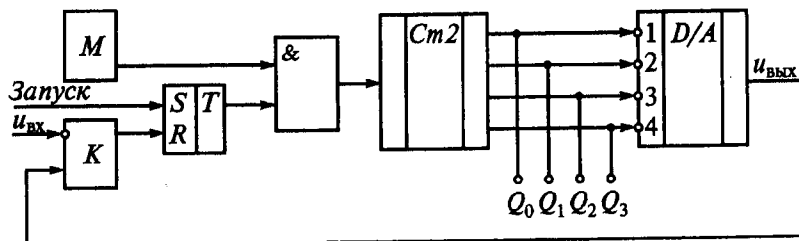


Рис. 4.31. Структурная схема АЦП последовательного счета

Начало преобразования входного непрерывного сигнала определяется временем поступления импульса запуска, который через RS-триггер T подключает счетчик $См2$ к выходу генератора тактовых (счетных) импульсов M .

Схема ЦАП D/A , куда поступает цифровой код со счетчика, формирует выходное напряжение $u_{\text{вых}}$, которое сравнивается в компараторе K с входным напряжением $u_{\text{вх}}$. При сравнении этих напряжений, компаратор через логический элемент И (&) выдает сигнал прекращения подачи на счетчик $См2$ тактовых импульсов. В результате осуществляется считывание со счетчика выходного четырехразрядного кода, представляющего в момент окончания преобразования цифровой эквивалент выходного напряжения.

В описанном АЦП значения выходного цифрового кода в процессе преобразования многократно изменяются, поэтому он обладает низким быстродействием.

Действие *параллельных* (по *методу считывания*) k -разрядных АЦП основано на использовании $2^k - 1$ компараторов (рис. 4.32). Неинвертирующие входы операционных усилителей компараторов объединены, и на них подается непрерывный сигнал, а к каждому инвертирующему входу подключено индивидуальное опорное напряжение, снимаемое с резистивного делителя.

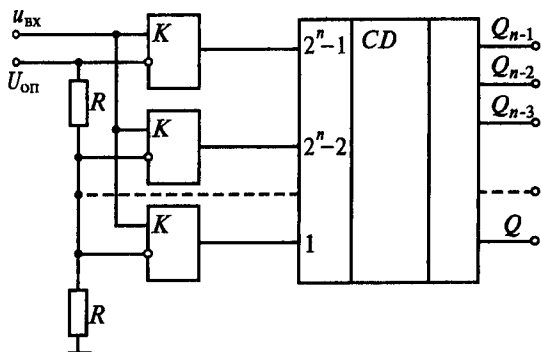


Рис. 4.32. Структурная схема параллельного АЦП

Разность между опорным напряжением двух соседних компараторов равна шагу квантования $\Delta = U_{\text{оп}}/2^k$. Компараторы, у которых входное напряжение превысит соответствующее опорное напряжение, вырабатывают логическую 1, а остальные — логический 0. Информация с выходов компараторов поступает на шифратор CD , который преобразует ее в двоичный код.

Параллельные схемы обладают наибольшим быстродействием среди других типов АЦП. Однако для повышения точности измерений и уменьшения мощности шумов квантования в параллельных АЦП требуется увеличение числа компараторов.

В *последовательно-параллельных* схемах АЦП используется сочетание методов последовательного и параллельного преобразования сигналов, что существенно увеличивает быстродействие последовательных преобразователей и уменьшает объем параллельных.

На рис. 4.33 показана структурная схема шестизрядного аналого-цифрового преобразователя данного типа, в которой используют два трехразрядных параллельных АЦП, один трехразрядный ЦАП и сумматор Σ .

13. Какой математический аппарат используется для спектрального представления периодических сигналов?
14. Какой математический аппарат используется для спектрального представления непериодических (импульсных) сигналов?
15. Чем отличается спектральная плотность непериодических сигналов от спектра периодических импульсов?
16. Какой спектр имеет гармонический сигнал?
17. Какие виды аналоговой модуляции сигналов используются в измерительной технике?
18. С помощью каких видов модуляции можно преобразовать аналоговый сигнал в импульсный и цифровой?
19. В каких случаях в измерительной технике применяется импульсно-кодовая модуляция?
20. В чем основная суть теоремы Котельникова?
21. Какие основные элементы используются в цифровых приборах?
22. Как выглядят таблицы истинности у основных логических элементов «И», «ИЛИ», «НЕ»?
23. Какие элементарные базовые элементы используются в цифровой технике?
24. Для каких целей применяют триггеры?
25. В каких устройствах используются счетчики?
26. По каким основным схемам включаются операционные усилители?
27. Для каких целей в устройствах измерительной техники используются компараторы на ОУ?
28. Как записываются числа в двоичной системе счисления?
29. Как записываются числа в тетрадно-десятичной системе?
30. Почему в цифровых приборах используется в основном тетрадно-десятичная система счисления?
31. Для каких целей применяются шифраторы и дешифраторы?
32. Как выглядят условные графические обозначения шифраторов и дешифраторов?
33. Как представляется обобщенная структурная схема цифрового измерительного прибора?
34. В чем заключается принцип действия ЦИП?
35. Как подразделяются приборы по методу преобразования входного сигнала в цифровой код?
36. По каким принципам строятся АЦП и ЦАП?

Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СИЛЫ ТОКА

Измерения напряжения и силы тока (в литературе и на практике принято говорить об измерении тока, но в принципе измеряют *силу тока*) в радиотехнических цепях существенно отличаются от подобных измерений в электротехнических цепях, что объясняется спецификой радиотехнических сигналов. Несмотря на ограниченное применение таких характеристик сигналов, как напряжение и сила тока, вольтметры и амперметры являются достаточно востребованными типами приборов.

5.1. Общие сведения

Измерения напряжения и силы тока в электрических цепях относятся к наиболее распространенным видам измерений. При этом преобладающее значение имеет измерение напряжения, так как чаще всего этой величиной принято характеризовать режимы работы различных радиотехнических цепей и устройств. К тому же параллельный метод подключения вольтметра к участку цепи, как правило, не приводит к нарушению электрических процессов в ней, поскольку входное сопротивление прибора выбирается достаточно большим. При измерениях же тока приходится размыкать исследуемую цепь и в ее разрыв последовательно включать амперметр, внутреннее сопротивление которого отлично от нуля. Однако в ряде случаев необходимы или прямые или косвенные измерения силы тока, поэтому вопросы измерения напряжения и силы тока в этой главе рассматриваются совместно.

Задача измерения постоянных напряжения и силы тока заключается в нахождении их значения и полярности. Целью измерения переменных напряжения и силы тока является определение какого-либо их параметра.

Так как напряжение и сила тока связаны, согласно закону Ома, линейной зависимостью, чаще проводят измерение напряжения и по его значению аналитически вычисляют силу тока.

Из курса физики известно, что напряжение между точками A и B есть скалярная величина, определяемая выражением

$$u_{AB} = \int_A^B \vec{E} d\vec{l}, \quad (5.1)$$

где $\vec{E}$ — напряженность электрического поля; $\vec{l}$ — расстояние между точками.

Современные методы и средства измерений позволяют измерять напряжения в диапазоне $10^{-10} \dots 10^6$ В и силу тока в диапазоне $10^{-18} \dots 10^5$ А. Вместе с тем данные измерения должны осуществляться в очень широкой полосе частот — от постоянного тока до сверхвысоких частот. Такие крайние значения величин требуют уникальных методов измерения.

Измерение параметров переменного напряжения — сложная метрологическая задача, связанная с обеспечением требуемого частотного диапазона и учетом формы кривой измеряемого сигнала. Переменное напряжение (переменный ток) промышленной частоты имеет синусоидальную форму

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (5.2)$$

и его мгновенное значение $u(t)$ характеризуется несколькими основными параметрами: амплитудой U_m , круговой частотой ω и начальной фазой φ .

Уровень переменного напряжения может быть определен по амплитудному, среднему квадратическому (часто в технической литературе употребляется термины «среднеквадратическое», «действующее» и «эффективное», которые соответствующим ГОСТом относятся к нерегламентируемым), среднему (постоянной составляющей) или средневывпрямленному значениям.

Мгновенные значения напряжения $u(t)$ наблюдают на экране осциллографа или другого индикаторного устройства и определяют в каждый момент времени (рис. 5.1).

Амплитуда (высота; устаревшее — пиковое значение) U_m — наибольшее мгновенное значение напряжения за время наблюдения или за период.

Измеряемые напряжения могут иметь различный вид, например, форму импульсов, гармонического или негармонических колебаний — суммы синусоиды с постоянной составляющей и т.д. (рис. 5.1, а, б, в). При разнополярных несимметричных кривых формы напряжения различают два амплитудных значения (рис. 5.1, г): положительное U_m^+ и отрицательное U_m^- .

Среднее квадратическое значение напряжения определяется как корень квадратный из среднего квадрата мгновенного значения напряжения за время измерения (или за период):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (5.3)$$

Если периодический сигнал несинусоидален, то квадрат среднего квадратического значения равен сумме квадратов постоянной составляющей и средних квадратических значений гармоник:

$$U^2 = U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots. \quad (5.4)$$

Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения равно среднему арифметическому всех мгновенных значений за период:

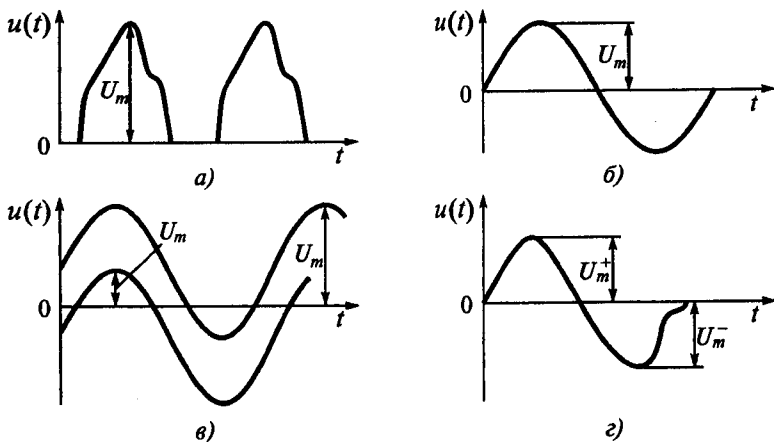


Рис. 5.1. Иллюстрации к понятию амплитуда напряжения:
 а — импульсы положительной полярности; б — синусоидальное напряжение;
 в — сумма синусоиды и постоянной составляющей; г — несинусоидальное колебание

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (5.5)$$

Средневыпрямленное напряжение определяется как среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$U_{\text{ср.в}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (5.6)$$

Для напряжения одной полярности среднее и средневыпрямленное значения равны. В случае разнополярных напряжений эти два значения могут существенно отличаться друг от друга. Так, для гармонического напряжения $U_{\text{ср}} = 0$, $U_{\text{ср.в}} = 0,637 U_m$.

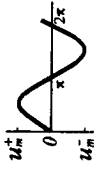
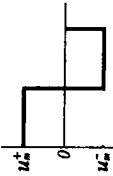
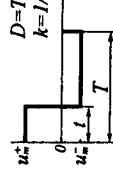
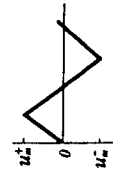
Наиболее часто измеряют среднее квадратическое значение напряжения, так как этот параметр связан с мощностью, нагревом, потерями. Однако проще измерить амплитудное или средневыпрямленное значение и произвести пересчет с применением коэффициентов амплитуды K_a и формы K_ϕ :

$$K_a = \frac{U_m}{U}; \quad K_\phi = \frac{U}{U_{\text{ср.в}}}. \quad (5.7)$$

В частности, для синусоидальной (гармонической) формы переменного напряжения: $K_a = 1,41$; $K_\phi = 1,11$.

Значения этих коэффициентов для наиболее употребляемых в радиотехнических цепях и средствах измерения видов сигналов и соотношения между ними даны в табл. 5.1, где все величины напряжений обозначены буквой u .

Таблица 5.1. Количественные соотношения между различными значениями ряда распротраненных сигналов

Форма сигнала	Параметры сигнала			
	Амплитуда	Средневыпрямленное значение	Среднее квадратическое значение	Коэффициент формы
	u_m	$u_{ср.в} = \frac{1}{T} \int_0^T u_x dt$	$u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_x^2 dt}$	$K_\phi = \frac{u}{u_{ср.в}}$
	$u_m^+ = u_m^-$	$\frac{2}{\pi} u_m = 0,637 u_m$	$0,707 u_m$	$\frac{u_m}{0,707 u_m} = 1,414$
	$u_m^+ = u_{m1}$ $u_m^- = -u_{m2}$ $u_m^+ + u_m^- = u_{m-m}$	$2 \frac{D-1}{D2} u_{m-m}$ или $2k(1-k) u_{m-m}$	$\sqrt{\frac{1}{D} \left(1 - \frac{1}{D}\right) u_{m-m}^2}$ или $\sqrt{k(1-k) u_{m-m}^2}$	$\sqrt{D-1}$ или $\sqrt{\frac{1-k}{k}}$
	$u_m^+ = u_m^-$	$\frac{u_m}{2} = 0,5 u_m$	$\frac{1}{\sqrt{3}} u_m = 0,577 u_m$	$\frac{u_m}{0,577 u_m} = 1,733$

5.2. Основные типы приборов, измеряющих напряжение и силу тока

Напряжение и силу тока измеряют приборами непосредственной оценки или приборами, использующими метод сравнения (компенсаторами). По структурному построению всевозможные приборы, измеряющие напряжение и силу тока, условно можно разделить на три основных типа:

- электромеханические;
- электронные аналоговые;
- цифровые.

Электромеханические приборы

Для измерения напряжения и силы тока 5...20 лет назад (иногда еще и в настоящее время) широко применялись электромеханические приборы. Приборы этих систем часто входят в состав и других, более сложных, средств измерений.

По физическому принципу, положенному в основу построения и конструктивному исполнению, эти приборы относятся к группе аналоговых средств измерения, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Электромеханические приборы непосредственной оценки измеряемой величины представляют класс приборов аналогового типа, обладающих рядом положительных свойств: просты по устройству и в эксплуатации, обладают высокой надежностью и на переменном токе реагируют на среднее квадратическое значение напряжения. Последнее обстоятельство позволяет измерять наиболее информативные параметры сигнала без методических ошибок. Электромеханические измерительные приборы строят по обобщенной структурной схеме, показанной на рис. 5.2.

Измерительная схема электромеханического прибора состоит из сово-

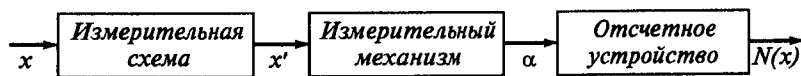


Рис. 5.2. Структурная схема электромеханического прибора

купности сопротивлений, индуктивностей, емкостей и других элементов электрической цепи прибора и осуществляет количественное или качественное преобразование входной величины x в электрическую величину x' , на которую реагирует измерительный механизм. Последний преобразует электрическую величину x' в механическое угловое или линейное перемещение α , значение которого отражается на шкале отсчетного устройства, програ-

дуированной в единицах измеряемой величины $N(x)$. Для этого необходимо чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовало одно и только одно определенное отклонение α . При этом параметры схемы и измерительного механизма не должны меняться при изменении внешних условий: температуры окружающей среды, частоты питающей сети и других факторов.

Классификацию электромеханических приборов производят на основании типа измерительного механизма. Наиболее распространенными в практике радиотехнических измерений являются следующие системы: *магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, электростатическая.*

Условное обозначение типа измерительной системы наносится на шкале прибора или средства измерения.

Данные измерительные системы представлены в табл. 5.2, где приведены также формулы передаточной функции (уравнения шкалы) измерительного механизма и ряд его технических характеристик.

В добавление к помещенным в табл. 5.2 сведениям и рисункам сделаем следующие пояснения.

Магнитоэлектрическая система. В этой системе измерительный механизм состоит из проволочной рамки с протекающим в ней током, помещенной в поле постоянного магнита (магнитопровода). Поле в зазоре, где находится рамка, равномерно за счет особой конфигурации магнитопровода. Под воздействием тока I рамка вращается в магнитном поле, угол поворота α ограничивают специальной пружиной, поэтому передаточная функция (часто называемая уравнением шкалы) линейна:

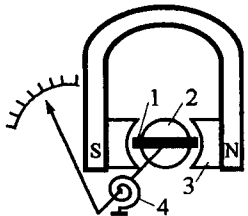
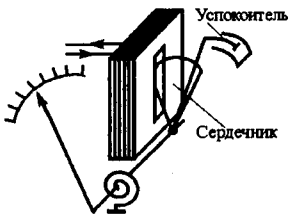
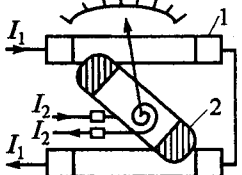
$$\alpha = I \frac{\Psi_0}{W}, \quad (5.8)$$

где Ψ_0 — удельное потокоцепление, определяемое параметрами рамки и магнитной индукцией; W — удельный противодействующий момент, создаваемый специальной пружиной.

На основе магнитоэлектрического механизма создаются вольтметры, амперметры, миллиамперметры и другие измерительные приборы, и их структурное построение главным образом определяется измерительной схемой. Измерительные приборы магнитоэлектрической системы имеют достаточно высокую точность, сравнительно малое потребление энергии из измерительной цепи, высокую чувствительность, но работают лишь на постоянном токе.

Для расширения пределов измерения токов амперметрами и напряжений вольтметрами применяют шунты и добавочные сопротивления, которые включают соответственно параллельно и последовательно индикаторам в схемы этих приборов.

Таблица 5.2. Электромеханические приборы

Наименование системы, функциональная схема	Уравнение шкалы, применение	Частотный диапазон, потребление мощности, класс точности
Магнитоэлектрическая: 1 – рамка с измеряемым током и стрелкой; 2 – неподвижный сердечник; 3 – полюсные наконечники 4 – возвратная пружина 	$\alpha = I \frac{\Psi_0}{W},$ где $\Psi_0 = BS\omega$; B – индукция в зазоре; S – площадь рамки; ω – число витков рамки; W – удельный противодействующий момент, создаваемый пружиной Переносные, лабораторные, многопредельные амперметры, вольтметры постоянного тока	Постоянный ток Класс точности 0,05...0,5 $P_{\text{сое}} \approx 10^{-5} \dots 10^{-4}$ Вт
Электромагнитная 	$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha},$ где $I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt$; L – индуктивность катушки Щитовые и лабораторные переносные низкочастотные амперметры, вольтметры	$F = 0 \dots 5$ кГц Класс точности 0,5...2,5 $P_{\text{сое}} \approx 1 \dots 6$ Вт
Электродинамическая 1 – неподвижная катушка 2 – подвижная катушка 	$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cos \theta \frac{dM}{d\alpha},$ где θ – угол между токами; M – коэффициент взаимной индуктивности катушек Лабораторные приборы низкочастотные высокого класса точности	$F = 0 \dots 5$ кГц Класс точности 0,1...0,2 $P_{\text{сое}} = 1$ Вт
Электростатическая 	$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{d\alpha}, \quad U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$ C – емкость между пластинами Высокочастотные лабораторные и высоковольтные вольтметры	$F = 0 \dots 30$ МГц Класс точности 0,5...1,5 $P_{\text{сое}} < 1$ мВт

Гальванометры. Особую группу измерителей тока составляют высоко-чувствительные магнитоэлектрические приборы — нуль-индикаторы, схемы сравнения, или указатели равновесия, называемые гальванометрами. Их задача показать наличие или отсутствие тока в цепи, поэтому они работают в начальной точке шкалы и должны обладать большой чувствительностью. Гальванометры снабжают условной шкалой и не нормируют по классам точности.

Чувствительность гальванометров выражается в мм или делениях (например, $S_i \approx 10^9$ мм/А). Такая высокая чувствительность достигается за счет особой конструкции прибора.

Поскольку чувствительность гальванометров очень высока, их градуировочная характеристика нестабильна и зависит от совокупности внешних влияющих факторов. Поэтому при выпуске на производстве чувствительные гальванометры не градуируют в единицах измеряемой физической величины и им не присваивают классы точности. В качестве же метрологических характеристик гальванометров обычно указывают их чувствительность к току или напряжению и сопротивление рамки.

Современные гальванометры позволяют измерять токи $10^{-5} \dots 10^{-12}$ А и напряжения до 10^4 В.

Электромагнитная система. Принцип действия электромагнитной системы основан на взаимодействии катушки с ферромагнитным сердечником. Ферромагнитный сердечник втягивается в катушку при любой полярности протекающего по ней тока. Это обусловлено тем, что ферромагнетик располагается в магнитном поле катушки так, что поле усиливается. Следовательно, прибор электромагнитной системы может работать на переменном токе. Однако электромагнитные приборы являются все-таки низкочастотными, так как с ростом частоты сильно возрастает индуктивное сопротивление катушки.

Достоинствами приборов электромагнитной системы являются простота конструкции, способность выдерживать значительные перегрузки, возможность градуировки приборов, предназначенных для измерений в цепях переменного тока, на постоянном токе. К недостаткам приборов этой системы можно отнести большое собственное потребление энергии, невысокую точность, малую чувствительность и сильное влияние магнитных полей.

На практике применяют амперметры электромагнитной системы с пределами измерения от долей ампера до 200 А, и вольтметры — от долей вольта до сотен вольт.

Приборы электромагнитной системы применяют в основном как щитовые амперметры и вольтметры переменного тока промышленной частоты. Класс точности щитовых приборов 1,5 и 2,5. В некоторых случаях они используются для измерений на повышенных частотах: амперметры до 8000 Гц, вольтметры до 400 Гц.

Пример 5.1. Класс точности большинства электромеханических приборов обозначен одной цифрой $\pm p$. Покажем, как пользоваться указанным значением класса точности на примере задачи.

При измерении напряжения сети вольтметром электромагнитной системы класса точности 1,5 со шкалой, максимальное значение которой $U_N = 300$ В (номинальное значение), показания прибора составляли 220 В. Чему в действительности может быть равна измеренная величина напряжения?

Решение. Полагая, что согласно (2.35) наибольшая приведенная основная погрешность составляет $p = \pm 1,5 \%$, определяем допусаемую абсолютную погрешность:

$$\Delta = \pm p \frac{U_N}{100} = \pm 1,5 \frac{300}{100} = \pm 4,5 \text{ В.}$$

Следовательно, истинное значение измеряемого напряжения лежит в границах: $(220 - 4,5) \text{ В} \leq U_{\text{ист}} \leq (220 + 4,5) \text{ В}$. Данное неравенство указывает на то, что истинное значение не может отклоняться от измеренного на величину более, чем $\pm 4,5$ В. В действительности это отклонение, как правило, оказывается меньшим, так как при установлении класса точности учитывается наихудшая комбинация факторов влияющих на инструментальную погрешность прибора.

Электродинамическая система — измерительный механизм содержит две измерительные катушки: неподвижную и подвижную. Принцип действия основан на взаимодействии катушек, электромагнитные поля которых взаимодействуют в соответствии с формулой:

$$M_{\text{вр}} = I_1 I_2 \cos \theta \frac{dM}{d\alpha}, \quad (5.9)$$

где $M_{\text{вр}}$ — вращающий момент; I_1 — ток через неподвижную катушку; I_2 — ток через подвижную катушку; θ — фазовый сдвиг между синусоидальными токами; M — коэффициент взаимной индуктивности катушек.

На основе электродинамического механизма в зависимости от схемы соединения обмоток могут выполняться вольтметры, амперметры, ваттметры. Достоинством электродинамических вольтметров и амперметров является высокая точность на переменном токе. Предел основной приведенной погрешности может быть 0,1...0,2 %, что является наилучшим достижимым показателем для измерительных приборов переменного тока. По другим показателям электродинамические приборы близки к электромагнитным. Электродинамические приборы используются как образцовые лабораторные измерительные приборы.

Электростатические приборы — принцип действия электростатического механизма основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Подвижная алюминиевая пластина, закрепленная вместе со стрелкой, перемещается, взаимодействуя с неподвижной пластиной. Ограниче-

ние движения (как и в других электромеханических системах) осуществляется за счет пружинки. Электростатические приборы по принципу действия механизма являются вольтметрами. Достоинства этих приборов: широкий частотный диапазон (до 30 МГц) и малая мощность, потребляемая из измерительной цепи. Приборы измеряют среднее квадратическое значение напряжения.

Магнитоэлектрические приборы с преобразователями переменного тока в постоянный

Описанные выше приборы не решают многих проблем, возникающих при измерении на переменном токе: электромагнитный и электродинамический — низкочастотны, электростатический обладает низкой чувствительностью. Применение магнитоэлектрического механизма в сочетании с преобразователем позволяет существенно расширить возможности измерений на переменном токе. По типу преобразователя данные приборы делятся на выпрямительные и термоэлектрические. Описание свойств схем представлено в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Магнитоэлектрическая система с преобразователями

Наименование системы, функциональная схема	Уравнение шкалы, применение	Частотный диапазон, класс точности, потребление мощности
Выпрямительная система Форма тока в амперметре	$\alpha = \frac{\Psi_0}{W} I_{\text{ср в}},$ где $I_{\text{ср в}} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt$ Переносные многопредельные амперметры-вольтметры на постоянный и переменный ток	$F = 0 \dots 100$ кГц Класс точности 2,5...4 на переменном токе, 1,5 на постоянном токе $P_{\text{ср в}} = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ Вт
Термоэлектрическая система: 1 — нагреватель; 2 — термопара	$\alpha = A I^2,$ где $I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt$ A — коэффициент, учитывающий параметры нагревателя термопары и прибора. Амперметры на повышенную частоту —	$F = 0 \dots 10$ МГц Класс точности 1,5...4,0 $P_{\text{ср в}} = 0,01 \dots 1$ Вт

Выпрямительные приборы состоят из полупроводникового преобразователя переменного тока в постоянный и магнитоэлектрического прибора. Основным узлом электрической схемы выпрямительного прибора является преобразователь. Для его построения широко используются полупроводниковые диоды. Применение полупроводниковых диодов основано на

явлении нелинейной зависимости между приложенным напряжением и протекающим через них током. Вследствие нелинейности характеристики диода спектр протекающего через него тока содержит составляющие частот, кратных частоте измеряемого напряжения, а также постоянную составляющую, отражающую информацию о значении измеряемой величины.

Технически удобнее выделить постоянную составляющую выходного тока (или напряжения), значение которой связано определенной функциональной зависимостью с измеряемым напряжением, и которая может служить сигналом измерительной информации. В этом случае основные операции, выполняемые электрической схемой вольтметра — преобразование измеряемого напряжения с помощью нелинейного устройства, выделение постоянной составляющей и ее измерение показывающим измерительным прибором.

Схема преобразователя может строиться разными способами, но в результате через измерительный механизм протекает однополярный пульсирующий ток (двухполупериодный или однополупериодный).

В табл. 5.3 показан простейший двухполупериодный (двухтактный) диодный выпрямитель. В силу того, что магнитоэлектрическая измерительная система реагирует на постоянный (средневыпрямленный) ток, показания прибора будут пропорциональны средневыпрямленному значению переменного тока или напряжения. Данное обстоятельство является очень существенным, так как приборы проградуированы в *средних квадратических значениях* синусоидального тока. Это значит, что на шкале прибора представлено не то значение, на которое реагирует прибор (т.е. средневыпрямленное), а величина, умноженная на коэффициент формы синусоиды $K_\phi = 1,11$.

При измерении параметров переменного негармонического сигнала, практически всегда возникает методическая погрешность. Например, при градуировке измерительного прибора на синусоидальном токе точке шкалы в 100 В соответствовало средневыпрямленное значение напряжения 90 В. Если на этот измерительный прибор подать напряжение, имеющее форму меандра с параметрами, изображенными на рис. 5.3 (напомним, что у такого сигнала $K_a = K_\phi = 1$, т.е. $U_m = U = U_{cp} \approx 90$ В), его показания также будут около 100 В ($1,11 U_{cp}$) и абсолютная погрешность измерения напряжения составит: $\Delta = 100 - 90 = 10$ В.

Выпрямительные приборы применяются как комбинированные измерители постоянного и переменного тока и напряжения с пределами измерения тока от 1 мА до 600 А, напряжения от 0,1 до 600 В.

Достоинства выпрямительных приборов являются высокая чувствительность, малое собственное

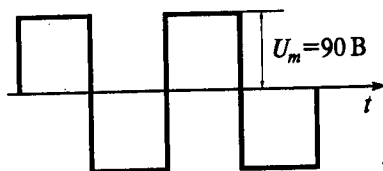


Рис. 5.3. Переменное напряжение меандровой формы

1

потребление энергии и возможность измерения в широком диапазоне частот. Частотный диапазон выпрямительных приборов определяется применяемыми диодами. Так, использование точечных кремниевых диодов обеспечивает измерение переменных токов и напряжений на частотах $50 \dots 10^5$ Гц. Основными источниками погрешностей приборов являются изменения параметров диодов с течением времени, влияние окружающей температуры, а также отклонение формы кривой измеряемого тока или напряжения от той, при которой произведена градуировка прибора. Выпрямительные приборы выполняются в виде многопредельных и многоцелевых лабораторных измерительных приборов. К этому типу измерительных приборов относится так называемый *тестер*.

Термоэлектрическая система — приборы состоят из термоэлектрического преобразователя и магнитоэлектрического микроамперметра. Термопреобразователь включает нагреватель, по которому протекает измеряемый ток, и термопару, на концах которой возникает термоЭДС. В цепь термопары включен микроамперметр, измеряющий термоток. Рабочий спай термопары находится в тепловом контакте с нагревателем. Нагреватель представляет собой тонкую проволоку из металлического сплава с высоким удельным сопротивлением (нихром, манганин). Еще более тонкие проволочки из термоэлектродных материалов применяют для изготовления термопары. При прохождении измеряемого тока через нагреватель, место его контакта с термопарой нагревается до температуры нагрева, а холодный спай остается при температуре окружающей среды. Функционирование прибора основано на тепловом действии тока, и поэтому магнитоэлектрический прибор с термоэлектрическим преобразователем измеряет среднее квадратическое значение переменного тока любой формы.

Термоэлектрические приборы применяют в основном для измерения токов. В качестве вольтметров они практически не используются, так как их входное сопротивление чрезвычайно мало. Достоинством термоэлектрических приборов является широкий частотный диапазон (до 10 МГц). Недостатки: невысокая чувствительность, низкий класс точности (1,5...4,0), большое потребление энергии из измерительной цепи.

5.3. Компенсаторы постоянного тока

Рассмотренные ранее приборы электромеханической группы являются приборами непосредственной оценки измеряемого параметра и все (в большей или меньшей степени) потребляют мощность из измерительной цепи, что может приводить к нарушению работы исследуемого объекта. Измерение тока и напряжения аналоговыми электромеханическими приборами возможно в лучшем случае с погрешностью 0,1 % (класс точности прибора 0,1). Более точные измерения можно выполнить методом сравнения с мерой. Сред-

ства измерений, использующие метод сравнения, называются компенсаторами или потенциометрами.

Компенсаторы — приборы, в которых измерение производится методом сравнения измеряемой величины с эталонной. Принцип действия компенсатора основан на уравнивании (компенсации) измеряемого напряжения известным падением напряжения на образцовом резисторе. Момент полной компенсации фиксируется индикаторным прибором (нуль-индикатором). Разработаны компенсаторы переменного и постоянного тока. Компенсационный метод применяется также в цифровых измерительных приборах.

Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока для измерения напряжения U_x показана на рис. 5.4.

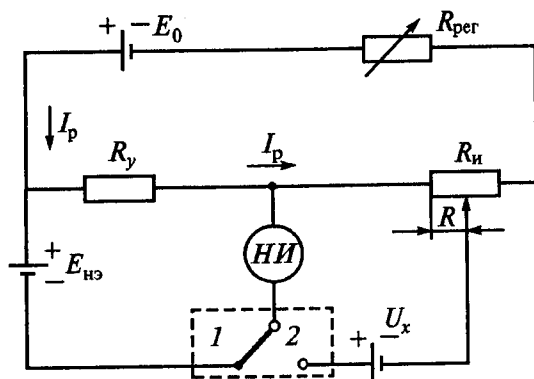


Рис. 5.4. Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока

Источник постоянного напряжения E_0 обеспечивает протекание рабочего тока I_p по цепи, состоящей из последовательно включенных измерительного $R_{и}$, установочного (образцового) R_y и регулировочного $R_{рег}$ резисторов. В качестве источника образцовой ЭДС (меры ЭДС) используется нормальный элемент $E_{нз}$ — изготавливаемый по специальной технологии гальванический элемент, среднее значение ЭДС которого при температуре 20°C известно с точностью до пятого знака и равно $E_{нз} = 1,0186\text{ В}$. Установочный резистор R_y представляет собой катушку сопротивления специальной конструкции с точно известным и стабильным сопротивлением. В схеме элемент НИ — нуль-индикатор, реагирующий на очень маленькие постоянные токи (чувствительность по току $S_{НИ}$ — порядка 10^{-10} дел/А).

Относительная погрешность нормального элемента может быть в пределах от 0,02 до 0,0002 %. С помощью переключателя нуль-индикатор вначале включается в цепь установочного сопротивления R_y (положение переключателя 1). При этом регулировочным сопротивлением $R_{рег}$ добиваются отсутствия тока в

цепи нуль-индикатора. Это означает, что $I_p R_y = E_{ю}$, откуда значение рабочего тока определяется через соотношение $I_p = E_{ю}/R_y = 10^{-n}$ А (для каждого типа компенсатора величина n — число индивидуальное и неизменное, что обеспечивается постоянством параметров источника напряжения $E_{ю}$ и установочного сопротивления R_y). Затем нуль-индикатор включается в измерительную цепь (положение переключателя 2) и изменением измерительного сопротивления $R_{и}$ добиваются нулевого тока, а значит, равенства $U_x = I_p R = E_{ю} R/R_y$. Итак, измеряемое напряжение определяется с достаточно высокой точностью и без нарушения работы измерительной цепи, так как в момент измерения ток через индикатор не протекает.

С помощью компенсатора можно также определять ток в исследуемом устройстве, преобразовав его предварительно в напряжение согласно формуле $I_x = U_x/R_o$, где R_o — образцовое сопротивление.

При измерениях напряжений на производстве применение находят автоматические компенсаторы, в которых поддерживается разностное значение $\Delta U_x = I_p R_{нач} - I_p R_{кон} \rightarrow 0$ с помощью следящей системы. Здесь $R_{нач}$ и $R_{кон}$ — части измерительного сопротивления в начале и конце цикла слежения.

В современных конструкциях компенсаторов вместо нормального элемента часто применяются эталонные (в частности стабилизированные) источники напряжения с более высоким значением коэффициента стабилизации, что позволяет расширить верхний предел измерения компенсатора до нескольких десятков вольт.

Погрешность компенсатора постоянного тока определяется погрешностями резисторов $R_{и}$, R_y , ЭДС нормального элемента $E_{ю}$, а также чувствительностью нуль-индикатора. Современные потенциометры постоянного тока имеют класс точности от 0,0005 до 0,2. Верхний предел измерения до 1...2,5 В. При достаточной чувствительности нуль-индикатора нижний предел измерения может составлять единицы нановольт.

Компенсационные методы используются также для измерений и на переменном токе.

5.4. Аналоговые электронные вольтметры

При измерении напряжения методом непосредственной оценки вольтметр подключается параллельно участку исследуемой цепи. Для уменьшения методической погрешности измерения собственное потребление вольтметра должно быть мало, а его входное сопротивление велико. Поэтому в последние годы в основном используются электронные вольтметры.

Электронные вольтметры представляют собой сочетание электронного преобразователя и измерительного прибора. В отличие от вольтметров электромеханической группы электронные вольтметры постоянного и переменного токов имеют высокие входное сопротивление и чувствительность, ши-

рокие пределы измерения и частотный диапазон (от 20 Гц до 1000 МГц), малое потребление тока из измерительной цепи.

Классифицируют электронные вольтметры по ряду признаков:

- по назначению — вольтметры постоянного, переменного и импульсного напряжений; универсальные, фазочувствительные, селективные;
- по способу измерения — приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;
- по характеру измеряемого значения напряжения — амплитудные (пиковые), среднего квадратического значения, средневыпрямленного значения;
- по частотному диапазону — низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные.

Кроме того, все электронные приборы можно разделить на две большие группы: аналоговые электронные со стрелочным отсчетом и приборы дискретного типа с цифровым отсчетом.

В соответствии с общепринятыми обозначениями отечественным электронным вольтметрам присваивается индекс В. Например ВК7-16А — вольтметр комбинированный (К) — может измерять сопротивление; 7 — универсальный на постоянный и переменный ток; 16 — номер разработки; А — модификация. Вольтметры постоянного тока имеют индексацию В2, а вольтметры переменного тока — В3.

При измерениях силы тока электронным вольтметром, вначале ток преобразуется в напряжение, а затем определяется по формуле: $I_x = U_x / R_0$.

Структурные схемы аналоговых вольтметров

Упрощенные структурные схемы аналоговых вольтметров представлены на рис. 5.5. В настоящее время аналоговые электронные вольтметры постоянного тока (рис. 5.5, а) находят ограниченное применение, так как они по своим техническим свойствам сильно уступают цифровым вольтметрам постоянного тока. Поэтому дальше рассматриваются только аналоговые вольтметры переменного тока.

Изображенная на рис. 5.5, б структурная схема используется в вольтметрах переменного тока для измерения напряжений значительного уровня. Частотный диапазон таких вольтметров может составлять сотни мегагерц.

Чтобы обеспечить необходимую точность вольтметра к усилителям постоянного тока, применяемым в электронных вольтметрах, предъявляются жесткие требования в отношении линейности амплитудной характеристики, постоянства коэффициента усиления, температурного и временного дрейфа нуля. При построении электронных вольтметров для измерения малых напряжений эти требования не всегда могут быть удовлетворены. Поэтому электронные вольтметры переменного тока для измерения малых напряжений выполняются по схеме рис. 5.5, в. Эта схема применяется в милливольтметрах, поскольку обладает большой чувствительностью. Последнее связано

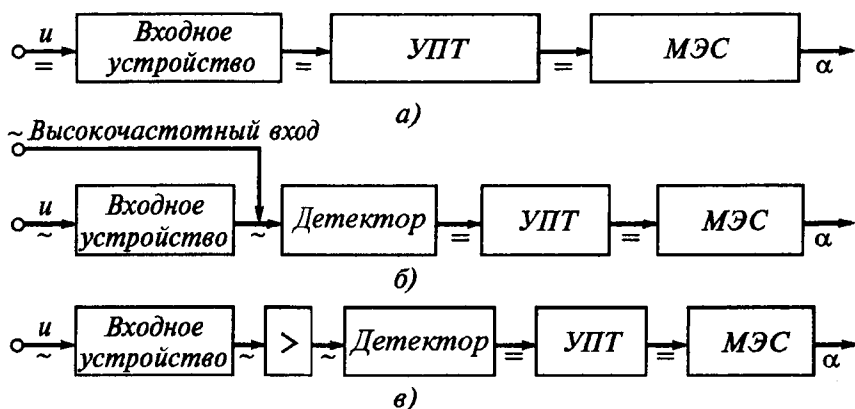


Рис. 5.5. Структурные схемы аналоговых электронных вольтметров:
 а — постоянного тока; б — напряжений большого уровня; в — милливольтметр
 (УПТ — усилитель постоянного тока; > — усилитель переменного тока;
 МЭС — магнитоэлектрическая система — стрелочный прибор)

с наличием дополнительного усилителя переменного тока, однако частотный диапазон схемы ниже (до сотен кГц), так как возникают трудности при создании широкополосного усилителя.

Элементная база, используемая при создании вольтметров переменного тока, определяется существующим на момент их создания уровнем техники, однако функциональное назначение блоков идентично. При этом особенно важную функцию несут преобразователи переменного напряжения в постоянное (детекторы). Детекторы можно классифицировать по функции преобразования входного напряжения в выходное: амплитудные (пиковые), среднего квадратического и средневывпрямленного значения. Тип детектора во многом определяет свойства прибора: вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными; вольтметры с детекторами среднего квадратического значения позволяют измерять напряжение любой формы; вольтметры средневывпрямленного значения измеряют только гармонические сигналы, но являются самыми простыми и надежными.

Ниже приводятся некоторые простейшие структурные схемы детекторов.

Амплитудный детектор — устройство, напряжение на выходе которого, т.е. на нагрузке, соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого напряжения. Чтобы цепь нагрузки детектора эффективно отфильтровывала постоянную составляющую и подавляла паразитные высокочастотные гармоники, необходимо выполнение неравенства:

$$1/(\omega C_n) \ll R_n, \quad (5.10)$$

где C_n — емкость фильтра; R_n — сопротивление нагрузки детектора.

Еще одно условие эффективной работы детектора — сопротивление резистора нагрузки R_H должно быть значительно больше сопротивления диода в его прямой проводимости, что практически всегда выполняется.

На рис. 5.6 изображены принципиальная и эквивалентная схемы и временные диаграммы амплитудного детектора с параллельным включением диода (детектор с закрытым входом).

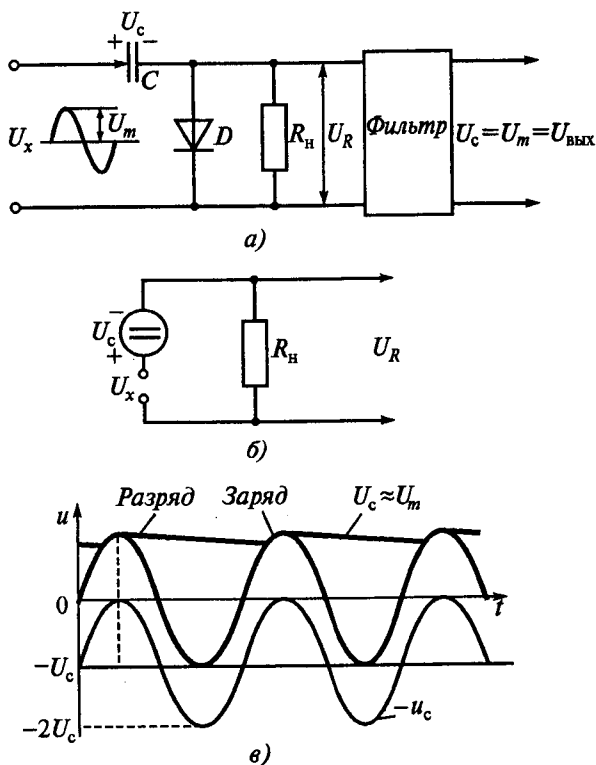


Рис. 5.6. Амплитудный детектор с параллельным диодом:

a — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема; *в* — временные диаграммы

Рассмотрим работу детектора (рис. 5.6, *a*) при подаче на его вход гармонического напряжения $u_x(t) = U_m \sin \omega t$.

На интервалах времени, когда на вход детектора поступает положительная полуволна, конденсатор C заряжается через диод, сопротивление R_0 которого в открытом состоянии мало. Постоянная времени заряда $\tau_z = R_0 C$ невелика и заряд конденсатора до максимального значения U_m происходит быстро. На интервале действия отрицательной полуволны диод закрыт и конденсатор C медленно разряжается на сопротивлении нагрузки R_H , так как оно выбирается достаточно

большим (50...100 МОм). Итак, постоянная разряда $\tau_p = R_n C$ оказывается значительно больше периода $T = 2\pi/\omega$ входного переменного напряжения. В результате конденсатор останется заряженным до напряжения, близкого к $U_C = U_m = U_{\text{вых}}$. Упрощенная эквивалентная схема амплитудного детектора и временные диаграммы, поясняющие его работу, представлены на рис. 5.6, б, в.

Изменение напряжения на сопротивлении нагрузки R_n определяется разностью амплитуды входного напряжения U_x и напряжения на конденсаторе U_C , т.е. $U_R = U_x - U_C$. Таким образом, выходное напряжение U_R будет пульсирующим с удвоенной амплитудой измеряемого напряжения, как это показано на рис. 5.6, в. Это подтверждают простые математические выкладки:

$$U = U_m \sin \omega t - U_C \approx U_m \sin \omega t - U_m;$$

при $\sin \omega t = 1$ $U_R = 0$; при $\sin \omega t = 0$ $U_R = -U_m$; при $\sin \omega t = -1$ $U_R = -2U_m$.

Для выделения постоянной составляющей сигнала $U_{\Sigma} = -U_C$ на выходе детектора ставится емкостной фильтр, подавляющий остальные гармоники.

Нетрудно заметить, что чем меньше период исследуемого сигнала (чем выше частота), тем точнее выполняется равенство $U_C = U_m$. Этим объясняются высокочастотные свойства детектора.

Одним из достоинств аналоговых вольтметров с амплитудным детектором является независимость показаний прибора от формы сигнала. Обычно шкала амплитудных вольтметров градуируется в средних квадратических значениях синусоидального напряжения, т.е. показания прибора: $U_{\text{пр}} = U_m / K_a$.

Детектор среднего квадратического значения — преобразователь переменного напряжения в постоянное, пропорциональное корню квадратному из среднего квадрата мгновенного значения напряжения. Значит, измерение действующего напряжения связано с выполнением трех последовательных операций: возведение в квадрат мгновенного значения сигнала, усреднение и извлечение корня из результата усреднения (последняя операция обычно осуществляется при градуировке шкалы вольтметра). Возведение в квадрат мгновенного значения, как правило, производят ячейкой с полупроводниковым элементом путем использования квадратичного участка его характеристики; иногда этот участок создается искусственно.

На рис. 5.7, а представлена диодная ячейка $D_1 R_{1c}$, в которой постоянное напряжение E_1 приложено к диоду D_1 таким образом, что он оказывается закрытым до тех пор, пока измеряемое напряжение $u_x(t)$ на резисторе R_1 не превысит величины E_1 .

Следует иметь в виду, что начальный квадратичный участок вольт-амперной характеристики полупроводникового диода имеет, как правило, малую протяженность (рис. 5.7, б), поэтому эту часть удлиняют искусственно, по методу кусочно-линейной аппроксимации. Для этого в схеме детектора используют несколько идентичных диодных ячеек (рис. 5.7, в), аналогичных показан-

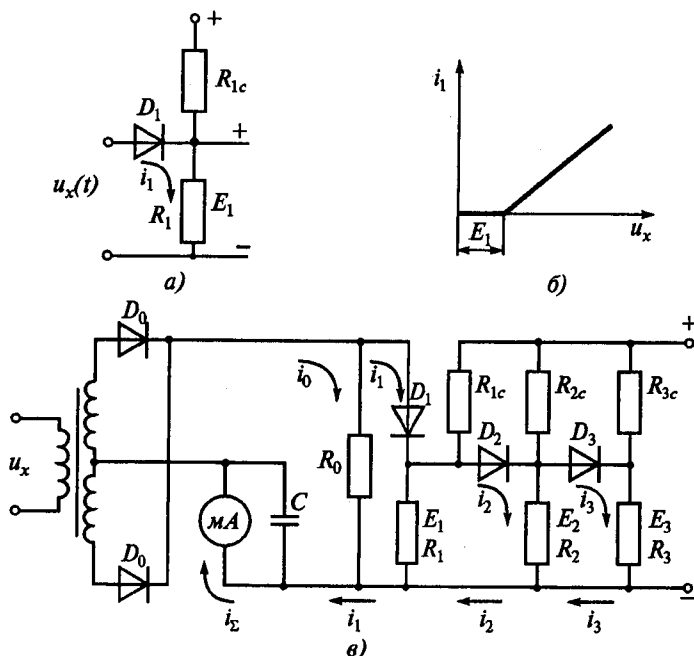


Рис. 5.7. Детектор среднего квадратического значения:
 а — диодная ячейка; б — идеализированная характеристика;
 в — схема квадратичного детектора

ной на рис. 5.7, а. Линейный участок обобщенной вольт-амперной характеристики при этом увеличивается.

На рис. 5.8 показано, как получается в этом случае квадратичная характеристика при последовательном включении цепочек резисторов R_{1c} , R_{2c} , R_{3c} с диодами D_1 , D_2 , D_3 . Диод D_1 первоначально закрыт напряжением E_1 , затем, по мере роста напряжения $u_x(t)$, он открывается и начальный линейный участок его идеализированной характеристики увеличивается.

В схеме, представленной на рис. 5.7, в, первоначально диоды D_1 , D_2 , D_3 закрыты соответствующими напряжениями смещения E_1 , E_2 , E_3 , и при малом входном напряжении $u_x(t)$ ток через миллиамперметр равен i_0 . Когда входное напряжение $u_x(t) > E_1$, открывается диод D_1 и параллельно резистору R_0 подключается делитель напряжения R_1 , R_{1c} . В результате крутизна вольтамперной характеристики на участке от E_1 до E_2 возрастает; суммарный ток, протекающий через миллиамперметр, станет $i_\Sigma = i_0 + i_1$. Когда выполнится условие $u_x(t) > E_2$, откроется диод D_2 и ток миллиамперметра $i_\Sigma = i_0 + i_1 + i_2$. При выполнении условия $u_x(t) > E_3$, откроется диод D_3 и суммарный ток, протекающий через миллиамперметр, будет $i_\Sigma = i_0 + i_1 + i_2 + i_3$.

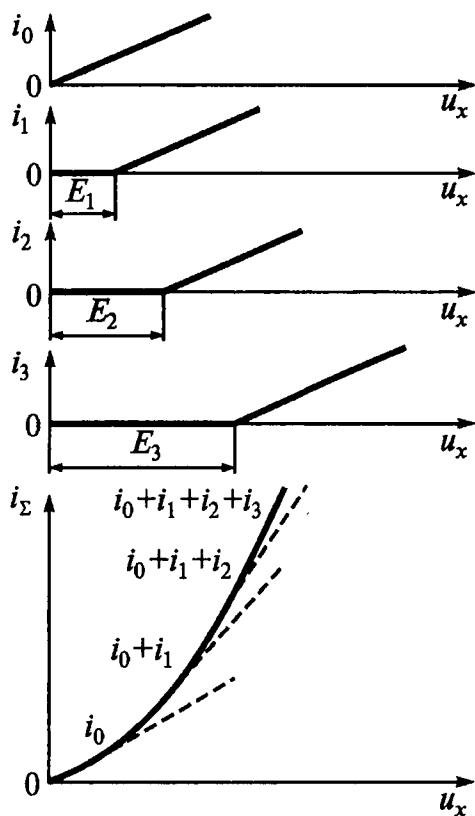


Рис. 5.8. Аппроксимация квадратичной вольт-амперной характеристики

В результате суммарная вольт-амперная характеристика приближается по форме к квадратичной кривой.

Показание прибора будет пропорциональным среднему квадратическому значению входного напряжения и оно не зависит от его формы.

При конструировании приборов действующего значения возникает целый ряд трудностей, в том числе и с обеспечением широкого частотного диапазона. Тем не менее эти приборы являются самыми востребованными, так как они позволяют измерять напряжение любой сложной формы.

Детектор средневых выпрямленного значения — устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянный ток, пропорциональный средневых выпрям-

ленному значению напряжения. Структура выходного тока измерительного прибора с детектором средневых выпрямленного значения аналогична ранее рассмотренному узлу выпрямительной системы и поэтому их свойства во многом идентичны (зависимость от формы сигнала, частотные характеристики, класс точности). Аналоговый электронный вольтметр средневых выпрямленного значения имеет более высокую чувствительность и меньшее потребление мощности от измерительной цепи (за счет дополнительного усиления), чем прибор со схемой выпрямления.

Интегральные амплитудные детекторы. Диодные (как и транзисторные) амплитудные детекторы при малых напряжениях вносят в измеряемый сигнал значительные нелинейные искажения. Поэтому в последние годы в измерительных устройствах применяют амплитудные детекторы на интегральных микросхемах — операционных усилителях — ОУ (рис. 5.9).

Так как детектор выполнен по инвертирующей схеме (возможно и неинвертирующее включение), то при подаче положительных полуволн напряжение u_2 на выходе ОУ будет отрицательным. При этом диод VD_1 открыт, а диод VD_2 закрыт. Выход ОУ через малое прямое сопротивление диода VD_1 подключен ко входу, что создает глубокую отрицательную обратную связь. В результате напряжение на выходе ОУ равно напряжению на его входе и близко к нулю. Выходное напряжение детектора тоже равно нулю. При подаче отрицательной полуволны напряжение u_2 на выходе ОУ будет положительным, поэтому диод VD_1 закрыт, а VD_2 — открыт. При этом напряжение на выходах ОУ и детектора $u_{\text{вых}} = u_2 = -u_{\text{вх}} R_2/R_1$.

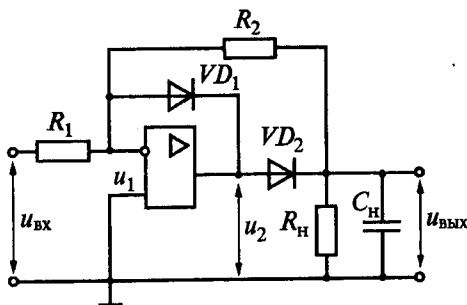


Рис. 5.9. Амплитудный детектор на ОУ

Выше были представлены различные виды преобразователей (детекторов), применяемых как в электронных аналоговых, так и в цифровых приборах. При выборе преобразователя следует обратить внимание на возможную методическую погрешность, возникающую при несинусоидальной форме сигнала. Это рассмотрено ниже на нескольких примерах.

Пример 5.2. На электронные вольтметры с различными детекторами подавались поочередно два сигнала разной формы, но с одинаковой амплитудой $U_m = 100$ В. Первый сигнал — синусоидальный; соответственно его коэффициент формы $K_{фс} = 1,11$, коэффициент амплитуды $K_{ас} = 1,41$. Поэтому среднее квадратическое значение $U_c = 70,7$ В, средневыпрямленное $U_{ср.вс} = 63,7$ В. Второй сигнал — меандр; среднее квадратическое и средневыпрямленное значения здесь равны между собой: $U_m = U_{ср.в.м} = 100$ В, так как коэффициенты формы и амплитуды $K_{ам} = K_{фм} = 1$.

Решение. Ответить на следующие вопросы.

А. Одинаковы или нет будут показания вольтметров при подаче сигналов отмеченной формы?

Б. Каковы погрешности измерения, вызванные несинусоидальностью формы сигнала?

В. Какую достоверную информацию можно получить при несинусоидальной форме сигнала по показаниям приборов.

При этом инструментальные погрешности приборов считают несущественными.

О т в е т ы:

1. Измерения производятся вольтметром с преобразователем среднего квадратического значения.

А. Так как прибор измеряет среднее квадратическое значение напряжений любой формы, то показания соответственно будут:

– при гармоническом сигнале $U_r = 70,7 \text{ В}$;

– для меандра $U_m = 100 \text{ В}$.

Б. Методических погрешностей нет.

II. Измерения проводятся вольтметром с преобразователем средневыпрямленного значения, градуированным при синусоидальном токе в средних квадратических значениях.

А. Показания прибора будут пропорциональны средневыпрямленному значению любой формы, умноженному на коэффициент $K_{\phi c} = 1,11$: $U_{пр} = K_{\phi c} U_{ср.в}$.

Показания прибора для синусоидального сигнала: $U_{пр c} = 1,11 \cdot 63,7 = 70,7 \text{ В}$ — что соответствует среднему квадратическому значению синусоидального напряжения.

Показания прибора для сигнала типа «меандр» будут $U_{пр м} = 1,11 \cdot 100 = 111 \text{ В}$, что превышает уровень среднего квадратического значения.

Б. Погрешность измерения несинусоидального сигнала: $\Delta_m = 111 - 100 = 11 \text{ В}$.

Относительная погрешность $\delta_m = 11/100 \cdot 100 \% = 11 \%$.

В. По показаниям прибора с преобразователем среднего значения при несинусоидальной форме сигнала можно определить только среднее или средневыпрямленное значение, т.е. для меандра $U_{ср.в м} = 111/1,11 = 100 \text{ В}$.

III. Измерения производятся прибором с преобразователем амплитудного значения.

А. Показания прибора будут пропорциональны амплитудному значению сигнала любой формы, деленному на градуировочный коэффициент. Если градуировка производилась при синусоидальном токе в средних квадратических значениях, то показания прибора соответственно: $U_{пр} = U_m / K_{ac} = U_m / 1,41$. Следовательно, показания прибора будут одинаковы для обеих форм сигнала: $U_{пр} = 100/1,41 = 70,7 \text{ В}$.

При этом для синусоиды это среднее квадратическое значение, а для меандра — меньше среднего квадратического (так как среднее квадратическое значение 100 В).

Б. Погрешность измерения для меандра составит: $\Delta = 100 - 70,7 = 29,3 \text{ В}$. Относительная погрешность $29,3 \%$.

В. По показаниям измерительного прибора можно определить амплитудное значение для любой формы сигнала. В данном случае, для сигнала формы меандра имеем: $U_{m м} = 70,7 \cdot 1,41 = 100 \text{ В}$.

5.5. Цифровые вольтметры

По виду измеряемой величины цифровые вольтметры делятся на: вольтметры постоянного тока, переменного тока (средневыпрямленного или среднего квадратического значения), импульсные вольтметры — для измерения параметров видео- и радиоимпульсных сигналов и универсальные вольтметры, предназначенные для измерения напряжения постоянного и переменного тока, а также ряда других электрических и неэлектрических величин (сопротивления, температуры и прочее).

Принцип работы цифровых измерительных приборов основан на дискретном и цифровом представлении непрерывных измеряемых величин. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра приведена на рис. 5.10. Схема состоит из входного устройства, АЦП, цифрового отсчетного устройства и управляющего устройства.

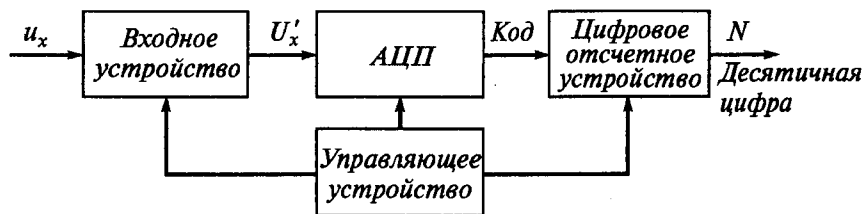


Рис. 5.10. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра

Входное устройство содержит делитель напряжения; в вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный.

АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, представляемый цифровым кодом. Процесс аналого-цифрового преобразования составляет сущность любого цифрового прибора, в том числе и вольтметра. Использование в АЦП цифровых вольтметров двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование цифрового кода в десятичное число, отражаемое цифровым отсчетным устройством.

Цифровое отсчетное устройство измерительного прибора регистрирует измеряемую величину. Управляющее устройство объединяет и управляет всеми узлами вольтметра.

По типу АЦП цифровые вольтметры могут быть разделены на четыре основные группы:

- кодоимпульсные (с поразрядным уравниванием);
- времяимпульсные;
- частотно-импульсные;
- пространственного кодирования.

В настоящее время цифровые вольтметры строятся чаще на основе кодоимпульсного и времяимпульсного преобразования.

АЦП вольтметров преобразуют сигнал постоянного тока в цифровой код, поэтому и цифровые вольтметры также считаются приборами постоянного тока. Для измерения напряжения переменного тока на входе вольтметра ставится преобразователь переменного напряжения в постоянное напряжение, чаще всего это детектор средневывпрямленного значения.

Проанализируем основные технические характеристики среднестатистического цифрового вольтметра постоянного тока:

- диапазон измерения: 100 мВ, 1 В, 10 В, 100 В, 1000 В;
- порог чувствительности (уровень квантования амплитуды напряжения или единица дискретности) на диапазоне напряжения в 100 мВ может быть 1 мВ, 100 мкВ, 10 мкВ;

- количество знаков (длина цифровой шкалы) — отношение максимальной измеряемой величины на этом диапазоне к минимальной; например: диапазону измерения 100 мВ при уровне квантования 10 мкВ соответствует 10^4 знаков;

- входное сопротивление электрической схемы — очень высокое, обычно более 100 МОм;

- помехозащищенность — так как цифровые вольтметры обладают высокой чувствительностью, очень важно обеспечить хорошую помехозащищенность.

Упрощенная структурная схема, поясняющая принцип возникновения помех на входе цифрового вольтметра показана на рис. 5.11.

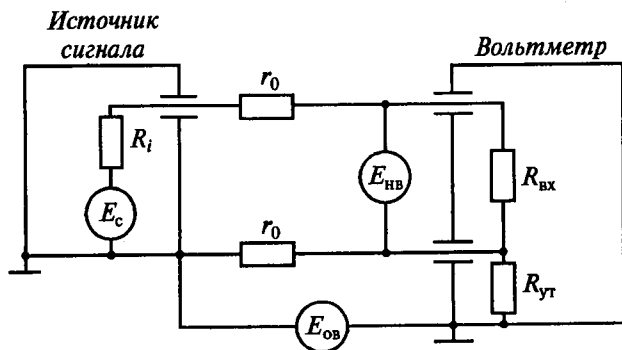


Рис. 5.11. Схема возникновения помех на входе цифрового вольтметра

Здесь E_c — источник сигнала; $E_{нв}$ — помеха, приложенная к входу вольтметра (помеха нормального вида, наводки); $E_{ов}$ — помеха общего вида, возникающая из-за разности потенциалов корпусов источника сигнала и вольтметра; R_i — внутреннее сопротивление источника сигнала; $R_{вх}$ — входное сопротивление вольтметра.

Помеха общего вида возникает в электрической схеме из-за несовершенства источников питания на частотах 50 и 100 Гц, создает падение напряжения на сопротивлении r_0 соединительного провода и переходит во входную цепь вольтметра, если сопротивление утечки $R_{ут}$ между клеммами и корпусом невелико. Если же одну из клемм прибора заземлить, то доля помехи общего вида, переходящая во входную цепь, увеличится. Поэтому при измерении малых сигналов пользуются изолированным от земли (корпуса) входом вольтметра.

Способы уменьшения влияния помех:

- использование экранированных проводов и изолированного входа вольтметра;

- применение интегрирующих вольтметров; при этом период помехи $u_{\text{пом}}(t) = U_{\text{м пом}} \sin \omega t$ кратен времени измерения и помеха устраняется по периоду согласно формуле:

$$U_{\text{пом}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{м пом}} \sin \omega t dt \rightarrow 0; \quad (5.11)$$

- включение на входе вольтметра фильтра с большим коэффициентом подавления помехи (60...70 дБ).

В последнем случае коэффициент подавления помехи определяется следующим образом: $K_{\text{под}} = 20 \lg (U_{\text{п вх}} / U_{\text{п вых}})$, где $U_{\text{п вх}}$ — амплитуда помехи на входе фильтра, $U_{\text{п вых}}$ — амплитуда помехи на его выходе.

Точность цифровых вольтметров. Распределение погрешности по диапазону измерения напряжений определяется *пределом допускаемой относительной основной погрешности* (2.35), характеризующей класс точности средства измерения:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100 \% = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{U_{\text{к}}}{u} \right| - 1 \right) \right], \quad (5.12)$$

где u — измеряемое напряжение; $U_{\text{к}}$ — конечное значение диапазона измерений; c, d — соответственно относительные приведенные суммарная и аддитивная составляющие погрешности.

Быстродействие. Современные схемы АЦП, применяемые в цифровых вольтметрах, могут обеспечить очень большое быстродействие, однако из соображений точной регистрации полученного результата и усреднения сетевой помехи у цифровых вольтметров оно уменьшается примерно до 20...50 измерений в секунду.

Кодоимпульсные цифровые вольтметры

В кодоимпульсных цифровых вольтметрах (в вольтметрах с поразрядным уравниванием) реализуется принцип компенсационного метода измерения напряжения. Упрощенная структурная схема такого вольтметра представлена на рис. 5.12.

Измеряемое напряжение U_x' , полученное с входного устройства, сравнивается с компенсирующим напряжением $U_{\text{к}}$, вырабатываемым прецизионным делителем и источником опорного напряжения. Компенсирующее напряжение имеет несколько уровней, квантованных в соответствии с двоично-десятичной системой счисления. Например, двухразрядный цифровой вольтметр, предназначенный для измерения напряжений до 100 В, может включать следующие уровни напряжений: 80, 40, 20, 10, 8, 4, 2, 1 В.

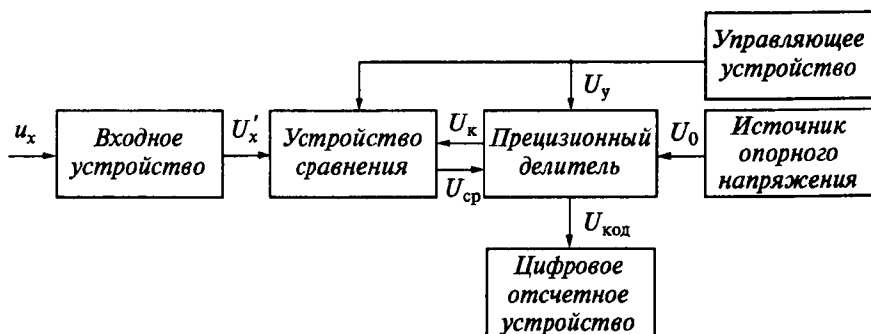


Рис. 5.12. Упрощенная структурная схема кодоимпульсного вольтметра

Сравнение измеряемого U'_x и компенсирующего U_k напряжений производится последовательно по командам управляющего устройства. Процесс сравнения напряжений показан на рис. 5.13. Управляющие импульсы U_y через определенные интервалы времени переключают сопротивления прецизионного делителя таким образом, что на выходе делителя последовательно возникают значения напряжения: 80, 40, 20, 10, 8, 4, 2, 1 В; одновременно к соответствующему выходу прецизионного делителя подключается устройство сравнения.

Если $U_k > U'_x$, то с устройства сравнения поступает сигнал U_{cp} на отключение в делителе соответствующего звена, так, чтобы снять сигнал U_k . Если $U_k < U'_x$, то сигнал с устройства сравнения не поступает. После окончания процесса сравнения полученный сигнал $U_{код}$ положения ключей прецизионного делителя и является тем кодом, который считывается цифровым отсчетным устройством.

На рис. 5.13 для наглядности показан процесс кодирования аналогового напряжения с амплитудой 63 В, из которого видно, что код, соответствующий этому сигналу, будет 01100011.

Процесс измерения напряжения в кодоимпульсном приборе напоминает взвешивание на весах, поэтому приборы иногда называют *поразрядно-уравновешивающими*. Точность кодоимпульсного прибора зависит от стабильности опорного напряжения, точности изготовления делителя, порога срабатывания сравнивающего устройства.

Для создания нормальной помехозащищенности (60...70 дБ) на входе приборов ставится помехоподавляющий фильтр. В целом такой цифровой прибор обладает хорошими техническими характеристиками и используется как лабораторный. Первые цифровые приборы создавались по методу взвешивания, но сейчас более широкое распространение получили приборы импульсного типа.

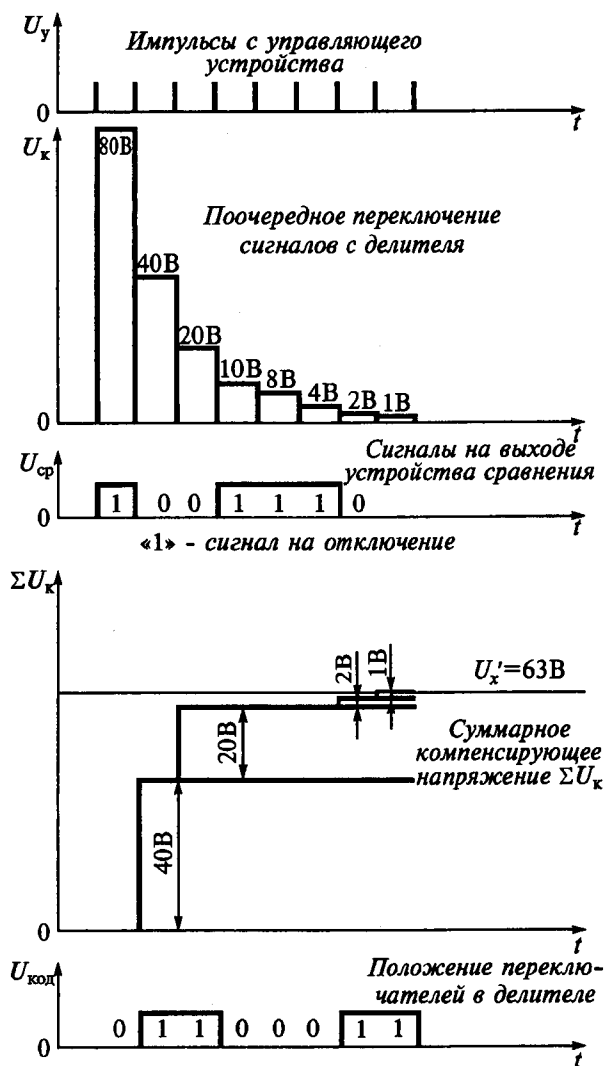


Рис. 5.13. Графики, поясняющие работу кодоимпульсного вольтметра

Вольтметры с времяимпульсным преобразованием

В основе принципа действия вольтметра времяимпульсного (временного) типа лежит преобразование с помощью АЦП измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, который заполняется счетными импульсами, следующими с известной стабильной частотой следования. В результате такого преобразования дискретный сигнал измерительной информа-

ции на выходе преобразователя имеет вид пачки счетных импульсов, число которых пропорционально уровню измеряемого напряжения.

Погрешность измерений времяимпульсных вольтметров определяется рядом факторов: погрешностью дискретизации измеряемого сигнала; нестабильностью частоты счетных импульсов; порогом чувствительности схемы сравнения и нелинейностью пилообразного напряжения.

Существует несколько схемотехнических решений, используемых при создании времяимпульсных вольтметров. Рассмотрим две такие схемы.

Времяимпульсный вольтметр с генератором линейно изменяющегося напряжения. Структурная схема времяимпульсного цифрового вольтметра и временные диаграммы, поясняющие ее работу, представлены на рис. 5.14. Данный тип вольтметра включает АЦП с промежуточным преобразованием измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени. В состав АЦП входят: генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН); два устройства сравнения I и II; триггер Т; логическая схема И; генератор счетных импульсов; счетчик импульсов и цифровое отсчетное устройство.

Дискретный сигнал измерительной информации на выходе преобразователя имеет вид пачки счетных импульсов, число которых N пропорционально величине входного напряжения U'_x (т.е. U_x). Линейно изменяющееся во времени напряжение $U_{\text{глин}}$ с ГЛИН поступает на входы I обоих устройств сравнения. Другой вход устройства сравнения I соединен с корпусом.

В момент, когда на входе устройства сравнения I напряжение $U_{\text{глин}} = 0$, на его выходе возникает импульс U_{ycl} , условно фиксирующий нулевой уровень входного сигнала. Этот импульс, подаваемый на единичный вход триггера Т, вызывает появление положительного напряжения на его выходе.

Возвращается триггер в исходное состояние импульсом U_{ycl} , поступающим с выхода устройства сравнения II. Импульс U_{ycl} возникает в момент равенства измеряемого U'_x и линейно изменяющегося напряжения $U_{\text{глин}}$. Сформированный в результате на выходе триггера импульс U_t длительностью

$$\Delta t = U'_x S$$

(здесь S — коэффициент преобразования) подается на вход схемы И, на второй вход которой поступает сигнал $U_{\text{гси}}$ с генератора счетных импульсов, следующих с частотой $f_0 = 1/T_0$.

На выходе схемы И сигнал $U_{\text{сч}}$ появляется только при наличии импульсов U_t и $U_{\text{гси}}$ на обоих ее входах, т.е. счетные импульсы проходят через схему И тогда, когда присутствует сигнал на выходе триггера.

Количество прошедших через схему И счетных импульсов

$$N \approx \Delta t / T_0$$

подсчитывается счетчиком и отображается на индикаторе цифрового отсчетного устройства прибора.

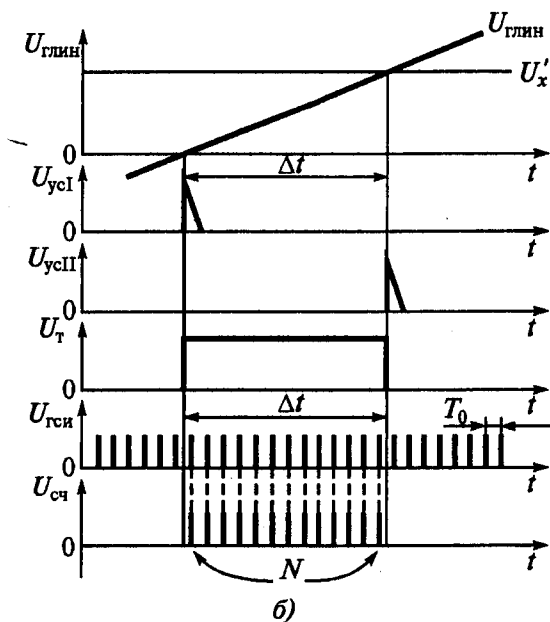
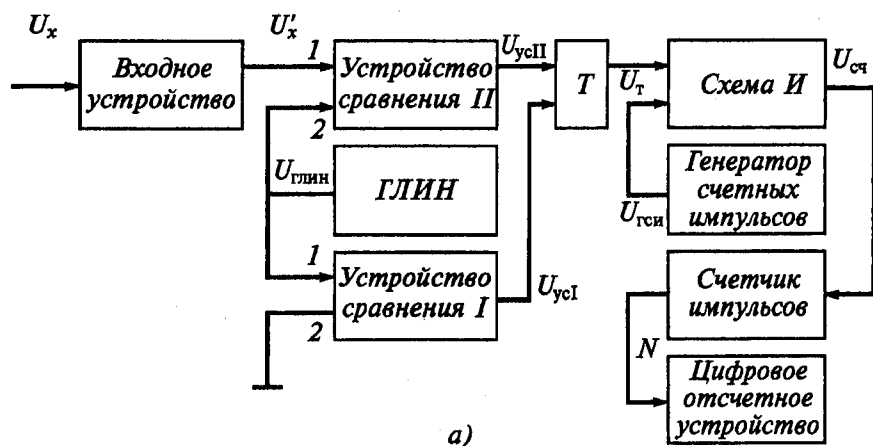


Рис. 5.14. Цифровой вольтметр с времяимпульсным преобразованием:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

Из двух последних соотношений получаем формулу для определения измеряемого напряжения:

$$U'_x = \frac{N}{f_0 S}. \quad (5.13)$$

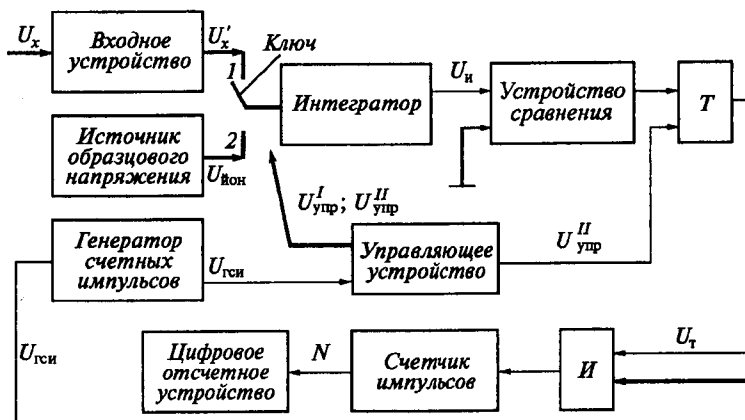
В вольтметре значение $f_0 S$ выбирают равным 10^m , где $m = 1, 2, 3, \dots$ (число m определяет положение запятой в цифровом отсчете) поэтому прибор непосредственно показывает значение измеряемого напряжения.

Рассмотренный цикл работы вольтметра периодически повторяется. Возврат ГЛИН в исходное состояние и подготовка схемы к очередному измерению осуществляется автоматически. По такому же принципу строятся цифровые вольтметры переменного тока. В них напряжение переменного тока предварительно выпрямляется и подается на устройство сравнения II.

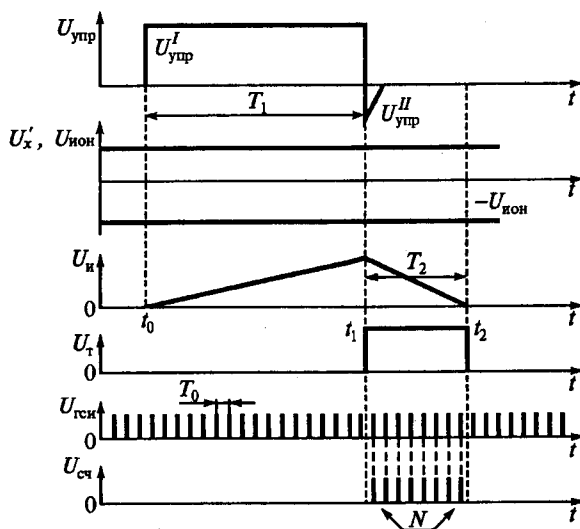
Формула (5.13) не учитывает погрешности дискретности из-за несовпадения момента появления счетных импульсов с началом и концом интервала Δt . Однако еще большую погрешность вносит фактор нелинейности коэффициента преобразования S . Недостатком метода времяимпульсного преобразования является также его невысокая помехоустойчивость. Шумовая помеха, наложенная на измеряемое напряжение U_x , изменяет его и, следовательно, изменяет момент появления импульса $U_{\text{сн}}$, определяющего длительность Δt времени счета. Поэтому вольтметры, построенные по данной схеме, являются наименее точными в ряду цифровых.

Времяимпульсные вольтметры с двойным интегрированием. Принцип работы вольтметра подобен принципу работы схемы с времяимпульсным преобразованием с тем отличием, что здесь в течение цикла измерения T формируются два временных интервала T_1 и T_2 . В первом интервале производится интегрирование измеряемого напряжения, а во втором — опорного напряжения. Длительность цикла $T = T_1 + T_2$ измерения задано устанавливается кратной периоду действующей на входе помехи. Это приводит к существенному повышению помехоустойчивости вольтметров.

Структурная схема вольтметра и временные диаграммы, поясняющие ее работу, представлены на рис. 5.15. Схема содержит входное устройство, двухпозиционный ключ, интегратор, источник образцового напряжения, устройство сравнения, триггер Т, генератор счетных импульсов, управляющее устройство, логическую схему И, счетчик импульсов и цифровое отсчетное устройство. В начале цикла измерения при $t = t_0$ устройство управления вырабатывает калиброванный импульс $U_{\text{упр}}^I$ длительностью $T_1 = T_0 K$, где T_0 — период следования счетных импульсов; K — емкость счетчика. В момент появления фронта импульса $U_{\text{упр}}^I$ ключ переводится в положение 1, и с входного устройства на интегратор поступает напряжение U'_x , пропорциональное измеряемому напряжению U_x .



а)



б)

Рис. 5.15. Цифровой вольтметр с двойным интегрированием:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

Затем, на интервале $T_1 = t_1 - t_0$ происходит интегрирование напряжения U'_x , (пропорционального измеряемому U_x) в результате чего нарастающее напряжение на выходе интегратора будет: $U_n = \int_{t_0}^{t_1} U'_x dt$.

В момент $t = t_1$ управляющий сигнал $U_{\text{упр}}^{\text{II}}$ переводит ключ в положение 2 и на интегратор с источника образцового напряжения подается образцовое отрицательное напряжение $U_{\text{ион}}$. Одновременно с этим управляющий сигнал $U_{\text{упр}}^{\text{II}}$ опрокидывает триггер.

Интегрирование напряжения $U_{\text{ион}}$ происходит быстрее, так как в схеме установлено $|U_{\text{ион}}| > U'_x$. Интегрирование опорного напряжения продолжается до тех пор, пока выходное напряжение интегратора снова не станет равным нулю (при этом $T_2 = t_2 - t_1$). Поэтому в течение времени второго интервала на

выходе интегратора формируется спадающее напряжение: $U_{\text{и}} = - \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{ион}} dt$.

При этом длительность интервала интегрирования T_2 тем больше, чем выше амплитуда измеряемого напряжения U'_x .

В момент времени $t = t_2$ напряжение $U_{\text{и}}$ на выходе интегратора становится равным нулю и устройство сравнения (второй вход соединен с корпусом) выдает сигнал на триггер, возвращая его в исходное состояние. На его выходе формируется импульс $U_{\text{т}}$ длительностью T_2 , поступающий на вход схемы И. На другой ее вход подается сигнал $U_{\text{гсн}}$ с генератора счетных импульсов. По окончании импульса $U_{\text{т}}$, поступающего с триггера, процесс измерения прекращается.

Преобразование временного интервала T_2 в эквивалентное число импульсов N осуществляется так же, как и в предыдущем методе — путем заполнения интервала T_2 импульсами генератора счетных импульсов и подсчета их числа счетчиком. На счетчике, а значит и на цифровом отсчетном устройстве записывается число импульсов $N(U_{\text{сч}})$, пропорциональное измеряемому напряжению U_x :

$$\int_{t_0}^{t_1} U'_x dt - \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{ион}} dt = 0. \quad (5.14)$$

Это выражение приводит к следующим формулам:

$$T_1 = T_0 K; \quad T_2 \approx T_0 N; \quad U'_x T_1 = U_{\text{ион}} T_2. \quad (5.15)$$

Из последних соотношений получим

$$U'_x = U_{\text{ион}} N/K. \quad (5.16)$$

Из приведенных соотношений видно, что погрешность результата измерения зависит только от уровня образцового напряжения (а не от нескольких, как в кодоимпульсном приборе). Однако здесь также имеет место погрешность дискретности. Достоинство прибора — высокая помехозащищенность,

так как он интегрирующий. На основе схем с двойным интегрированием выпускают приборы с более высоким классом точности, чем приборы с ГЛИН. Вольтметры этого типа имеют погрешность измерения $0,005 \dots 0,02 \%$.

Цифровые вольтметры наивысшего класса точности создаются комбинированными: в схемах сочетаются методы поразрядного уравнивания и времяимпульсного интегрирующего преобразования.

Большинство серийных цифровых вольтметров переменного тока строят с применением преобразователей переменного тока в постоянный (детекторов) средневывпрямленного и среднего квадратического значения. Свойства этих приборов будут во многом определяться детекторами.

Ц и ф р о в ы е м у л ь т и м е т р ы. Включение в схему цифрового вольтметра микропроцессора и дополнительных преобразователей позволяет превратить его в универсальный измерительный прибор — мультиметр. Цифровые мультиметры измеряют постоянное и переменное напряжение, силу тока, сопротивления резисторов, частоту электрических колебаний и т.д. При совместном использовании с осциллографом мультиметры позволяют измерять временные интервалы (период, длительность импульсов и пр.). Наличие в схеме вольтметра микропроцессора позволяет осуществлять автоматическую коррекцию погрешностей, автокалибровку и диагностику отказов.

На рис. 5.16 в качестве примера показан современный цифровой вольтметр с микропроцессором. Основными устройствами вольтметра являются микропроцессор, АЦП, блоки нормализации сигналов и управления.

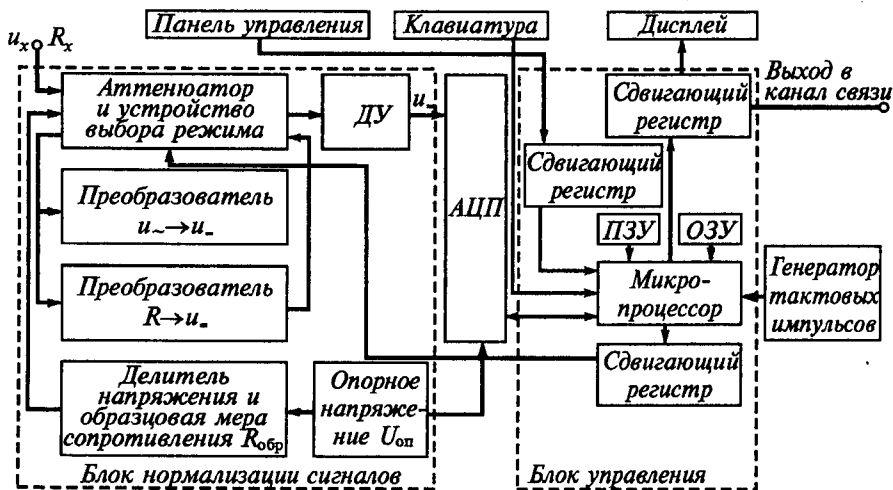


Рис. 5.16. Современный цифровой вольтметр с микропроцессором

Блок нормализации сигналов с помощью соответствующих преобразователей приводит входные измеряемые параметры (напряжения переменного и постоянного тока, сопротивления постоянному току и пр.) к унифицированному сигналу ($u_н$), который подается на вход АЦП. Последний действует обычно по методу двойного интегрирования. Блок управления обеспечивает выбор режима работы для заданного вида измерений, управление АЦП, дисплеем. Кроме того, он создает нужную конфигурацию системы измерения.

Основой блока управления является микропроцессор, который связан с другими узлами через сдвигающие регистры. Управление микропроцессором осуществляется с помощью клавиатуры, расположенной на панели управления или через стандартный интерфейс (блок сопряжения; стык) подключаемого канала связи. Программа работы микропроцессора хранится в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) и обеспечивается с помощью оперативного запоминающего устройства (ОЗУ).

Для измерений используются встроенные высокостабильные и прецизионные резистивные делители опорного напряжения, дифференциальный усилитель (ДУ) и ряд внешних элементов (аттенюатор и устройство выбора режима, блок опорного напряжения $u_{оп}$). Все импульсные и цифровые устройства синхронизируются сигналами генератора тактовых импульсов.

5.6. Техника измерения напряжения

Для измерения напряжения необходимо правильно выбрать прибор с учетом его диапазона измерения, частотного диапазона, класса точности, потребления мощности из измерительной цепи, влияния формы сигнала на результат измерения. Эти параметры указаны в технической документации на прибор. При этом следует обратить внимание на следующие важные обстоятельства. При измерении гармонических напряжений частота измеряемого сигнала должна находиться в пределах рабочего диапазона частот (желательно не у крайнего предела). Следует проверить по паспорту, не имеет ли место дополнительная частотная погрешность в измеряемой точке. При измерении сигналов сложной формы частотный диапазон должен выбираться с учетом частот высших гармоник. В этом случае правильную информацию о действующем значении сигнала отображают только электронные приборы, имеющие преобразователи среднего квадратического значения.

Если используется электронный прибор с амплитудным детектором, то по его показаниям можно определить действующее значение только для случая, когда известен коэффициент амплитуды измеряемого сигнала. Аналогично, при измерении прибором с преобразователем средневыпрямленного значения для определения среднего квадратического значения сигнала нужно знать коэффициент его формы $K_{ф\text{ сигн}}$.

Тогда, с учетом формулы (5.7), получим:

$$U = \frac{U_{\text{пр}} K_{\text{ф сигн}}}{K_{\text{ф}}} \approx \frac{U_{\text{пр}}}{1,11} K_{\text{ф сигн}}. \quad (5.17)$$

Необходимо помнить, что приборы среднвыпрямленного значения подчас вообще непригодны для измерения сигналов сложной формы, поскольку не обеспечивают необходимого частотного диапазона.

При измерениях на переменном токе с помощью электронных приборов необходимо иметь в виду, что основная их масса имеет «закрытый вход» для постоянной составляющей сигнала. Это обстоятельство позволяет производить измерения в электронных схемах, где уровень сигнала значительно меньше, чем постоянные напряжения режима покоя схемы. Однако при измерении импульсных сигналов приборами с амплитудными преобразователями на это следует обратить особое внимание.

С помощью временных диаграмм (рис. 5.17) показано, как можно определить параметры однополярных прямоугольных импульсов, амплитуда U_p , длительность τ и частота $f = 1/T$ следования которых известны.

Пусть шкала измерительного прибора отградуирована в действующих значениях синусоиды. Тогда показание прибора с амплитудным

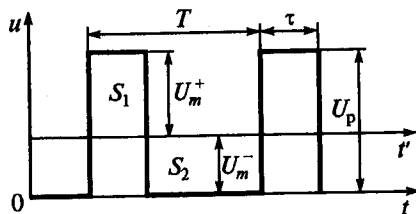


Рис. 5.17. Диаграммы к вольтметру с амплитудным преобразователем

преобразователем измеряемого напряжения должно быть: $U_{\text{пр}} = \frac{U_m}{1,41}$. Вслед-

ствие того, что прибор реагирует только на переменную составляющую сигнала, представленную на рис. 5.17 по отношению временной оси t' , показания прибора будут $U_{\text{пр}} = \frac{U_m^+}{1,41}$ или $U_{\text{пр}} = \frac{U_m^-}{1,41}$ в зависимости от полярности

его подключения, где $U_m^+ = U_p \frac{(T - \tau)}{T}$ — положительное амплитудное значение; $U_m^- = U_p \frac{\tau}{T}$ — отрицательное амплитудное значение импульса.

Формулы перевода напряжений получены из условия равенства нулю постоянной составляющей, т.е. площади S_1 и S_2 относительно временной оси t' равны:

$$S_1 = U_m^+ \tau, \quad S_2 = U_m^- (T - \tau). \quad (5.18)$$

Для обеспечения высокой точности измерений их следует производить в точках шкалы, где измеряемая величина близка к номинальному значению,

т.е. в конце шкалы. Кроме того, перед началом процесса измерений прибор следует вывести в номинальный режим, откалибровать и установить нулевое значение при закороченных входных зажимах.

Измерение шумового напряжения

Наиболее точно среднее квадратическое значение шумового напряжения можно измерить квадратичным вольтметром. Градуировка вольтметра с квадратичным детектором не зависит от формы напряжения, а следовательно, пригодна и в данном случае.

При измерении шумовых напряжений необходимо учитывать ряд специфических требований.

1. Шумовое напряжение может иметь большие выбросы, превышающие в 3...4 раза его среднее квадратическое значение. Поэтому протяженность квадратичного участка вольт-амперной характеристики детектора должна быть большой, при этом не должно быть ограничения шумового напряжения в усилителях, включенных до схемы детектора. Амплитудная характеристика входного усилителя должна быть линейной до уровня, вероятность превышения которого шумовым напряжением невелика. Обычно этот уровень выбирают равным утроенному среднему квадратическому значению напряжения.

2. Спектральная плотность шумового напряжения обычно занимает широкую полосу частот. Усилители, включенные до нелинейного устройства, не должны вносить линейных искажений.

3. При измерении показания вольтметра определяются реализацией исследуемого процесса за конечное время накопления, т.е. вольтметр измеряет среднее квадратическое значение отдельных реализаций шумового напряжения. Пусть исследуемый шум — стационарный эргодический случайный процесс и его математическое ожидание и дисперсия не зависят от времени. Показания вольтметра различны для разных реализаций, т.е. имеет место ошибка измерений, обусловленная конечностью времени накопления. Разброс показаний вольтметра от одной реализации к другой тем меньше, чем больше время накопления. При этом ошибка измерений также уменьшается. Для обеспечения требуемого времени усреднения в схеме вольтметра необходимо иметь фильтр, включаемый после нелинейного элемента. Роль фильтра может выполнять подвижная часть электромеханического прибора; в электронных приборах — это ФНЧ.

Измерения импульсных и высокочастотных напряжений

Импульсные напряжения измеряют с помощью импульсных вольтметров, построенных по схеме, представленной на рис. 5.6, а. В этой схеме возможно измерение амплитуды только положительных импульсов, для отрицательных необходимо обратное включение диода. Специальные импульсные вольтметры градуируются в амплитудных (пиковых) значениях.

При исследовании радиоимпульсов процессы в схеме вольтметра протекают так же, как и при измерении видеоимпульсов. Однако заряд конденсатора происходит только при положительных полупериодах несущей частоты, т.е. при положительной огибающей. Погрешность измерений в этом случае может возрасти.

В случае измерения импульсных напряжений необходимо иметь в виду, что спектр частот, занимаемый импульсами, бывает широким, особенно спектр радиоимпульсов малой длительности. Составляющие спектра могут находиться в области высоких частот, на которых появляются дополнительные погрешности.

При измерении напряжений высокой частоты появляется погрешность, обусловленная влиянием следующих факторов:

- наличием входных емкостей детектора, емкостью и индуктивностью монтажа; наличие этих емкостей приводит к резонансным явлениям, при этом напряжение, приложенное к конденсатору и диоду, не равно измеряемому напряжению, как это имеет место на низких частотах;
- инерционностью носителей заряда в активных элементах (например, транзисторах усилителей).

Для уменьшения погрешности первого вида необходимо частоту резонанса входной цепи расположить вне диапазона рабочих частот вольтметра и предельно уменьшить длину соединительных проводов. Для этого используемый в преобразователе детектор выполняют в виде отдельного выносного блока, который можно непосредственно подключать в точках, где измеряется напряжение. При этом максимально снижаются емкости и индуктивности соединительных проводников. Иногда измеряемое напряжение подается на вход вольтметра через отрезок длиной линии. Следует подчеркнуть, что резонансные процессы во входной цепи приводят к завышению значения измеряемого напряжения.

Инерционность носителей заряда ведет к тому, что вольтметр показывает заниженное значение измеряемого напряжения, причем занижение тем больше, чем выше частота.

Погрешности за счет резонанса и инерционности носителей заряда имеют противоположные знаки, и поэтому происходит их частичная (или полная) компенсация.

5.7. Особенности измерения силы токов

Существует ряд методов измерения силы токов в электрических цепях: кроме прямых измерений, широко используются косвенные измерения.

Прямое измерение силы тока. В этом случае амперметр включают последовательно в разрыв электрической цепи (рис. 5.18, а), в которой производится измерение силы тока.

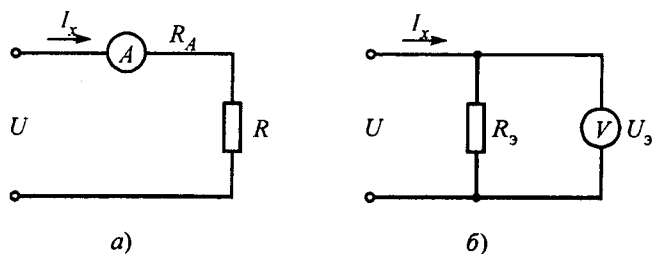


Рис. 5.18. Схемы измерения силы тока:
а — амперметром; б — с помощью вольтметра

Включение в исследуемую цепь амперметра искажает результат измерения. В частности, наличие в схеме рис. 5.18, а амперметра с внутренним сопротивлением R_A приведет к тому, что вместо силы тока $I_x = U/R$, который протекал в этой цепи без амперметра, после его включения пойдет ток:

$$I_1 = \frac{U}{R + R_A}. \quad (5.19)$$

Абсолютная погрешность измерения $\Delta I = I_x - I_1$ будет тем больше, чем выше внутреннее сопротивление амперметра R_A .

Измерение силы тока косвенным методом с помощью электронных вольтметров. Поскольку между напряжением и током в электрической цепи имеется линейная связь (согласно закону Ома), то ток может быть измерен косвенным методом с помощью схемы, показанной на рис. 5.18, б. При этом, измерив вольтметром напряжение на сопротивлении эталонного резистора R_s , силу тока находим по формуле:

$$I_x = \frac{U_s}{R_s}, \quad (5.20)$$

где U_s — напряжение, измеренное вольтметром; I_x — ток, подлежащий определению; R_s — активное эталонное сопротивление известного номинала.

Однако при измерении малых токов подобная методика может оказаться неприемлемой. В этом случае в измерительных приборах применяется схема входного усилительного каскада с достаточно малым входным сопротивлением. Одним из вариантов такого каскада может служить *преобразователь тока в напряжение* (см. рис. 4.27, б).

Особенности измерений малых токов и напряжений. Рассмотренные способы измерения напряжения или токов малых уровней основаны, главным образом, на применении усилителей. Для усиления

малых сигналов требуется иметь усилитель с большим коэффициентом усиления. Современный уровень развития электронной техники позволяет успешно решить эту задачу. Поэтому не коэффициент усиления, а внутренние шумы источника и усилителя исследуемого сигнала определяют предельно достижимый порог чувствительности при измерении малых уровней сигналов.

Контрольные вопросы

1. Что называется амплитудным, средним, средневыпрямленным и средним квадратическим значениями напряжения или тока?
2. Какие коэффициенты устанавливают связь между амплитудным и средним квадратическим, между средним квадратическим и средним значениями напряжения (тока)?
3. Чему равны коэффициенты амплитуды и формы для гармонической формы сигнала?
4. Из-за чего может возникать методическая погрешность при измерении несинусоидального сигнала? Приведите примеры приборов, в которых наблюдается такая погрешность.
5. Перечислить основные системы электромеханических приборов и дать сравнительные характеристики по параметрам.
6. Почему магнитоэлектрический механизм работоспособен только на постоянном токе? Что предпринимается для использования его в приборах переменного тока?
7. Какие системы электромеханических приборов являются высокочастотными?
8. Каковы достоинства компенсационного метода измерения?
9. Привести основные схемы построения электронных аналоговых вольтметров и их отличия.
10. Объяснить работу амплитудного диодного преобразователя переменного тока в постоянный. Почему амплитудный преобразователь является наиболее высокочастотным?
11. Как функционирует преобразователь среднего квадратического значения, реализованный с помощью кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики?
12. Как возникают на входе цифрового вольтметра помехи общего и нормального вида? Каковы методы борьбы с ними?
13. Какой принцип реализован в электрических схемах кодоимпульсных цифровых вольтметрах?
14. На каком принципе строят вольтметры времяимпульсного типа?

Глава 6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

При исследованиях, испытаниях, измерениях параметров или характеристик различных радиотехнических схем, устройств и систем требуются источники испытательных и реальных сигналов самых разнообразных форм, частот и мощностей. Подавая эти сигналы в исследуемую аппаратуру, измеряют ряд параметров электрических колебаний, применяя источник в качестве меры (частота гармонического колебания, период следования импульсов, коэффициент модуляции); снимают амплитудно-частотные и переходные характеристики цепей, а также определяют коэффициент шума различных устройств; градуируют или тестируют измерительные приборы; запитывают измерительные линии при определении коэффициентов бегущей и стоячей волны, коэффициентов отражения и полных сопротивлений нагрузки СВЧ устройств. Такие источники различных колебаний называют измерительными генераторами сигналов.

6.1. Общие сведения

Измерительные генераторы сигналов (автогенераторы) — источники сигналов различных форм и частот, предназначенные для работы с радиоэлектронными схемами. Они имеют ряд принципиальных отличий от обычных генераторов: обладают возможностью точной установки и регулировки выходных параметров колебаний (частоты, формы и уровня напряжения или мощности) в широких диапазонах; имеют высокую стабильность параметров и встроенные измерительные приборы, позволяющие контролировать установки сигналов; могут работать совместно с другими средствами измерения и программного управления.

В зависимости от формы выходных сигналов различают *измерительные генераторы гармонических и релаксационных (импульсных) колебаний*. В спектре выходного сигнала генератора гармонических колебаний имеется одна или несколько гармоник. Выходные колебания релаксационного генератора содержат широкий спектр гармоник, имеющих соизмеримые амплитуды.

По частотному диапазону генераторы делятся на: инфранизкочастотные (0,01...20 Гц), низкочастотные, или генераторы звукового диапазона (20...300000 Гц), генераторы высоких частот (0,3...300 МГц), сверхвысокочастотные (СВЧ, свыше 300 МГц). Особую группу представляют генераторы *случайных колебаний (сигналов)* — измерительные генераторы шумовых сигна-

лов. Отметим также генераторы псевдослучайных и линейно-изменяющихся напряжений (ГЛИН), которые относятся к релаксационным генераторам. Такие генераторы используют как измерительные, так и в качестве генераторов разверток.

Независимо от назначения, принципа действия и схемотехнического выполнения генератор любых перечисленных колебаний (кроме параметрических схем генерации) состоит из *нелинейного усилителя, цепи положительной обратной связи и источника питания постоянного тока*. Форма и частота выходных колебаний определяются только параметрами самого генератора.

Генератор гармонических колебаний должен содержать в своем составе *узкополосную колебательную систему*. Принцип действия релаксационных генераторов основан на зарядно-разрядных или накопительно-поглощающих явлениях, протекающих в *широкополосных энергоемких цепях* положительной обратной связи.

Рассмотрим условия самовозбуждения генератора гармонических колебаний. Для возбуждения и генерации колебаний часть их мощности с выхода усилителя (точнее, с колебательной системы) подается на его вход по специально введенной цепи положительной обратной связи (ОС). Говоря иначе, подобное устройство «возбуждает само себя» и поэтому называется *генератором с самовозбуждением*.

Механизм возникновения колебаний в генераторе можно упрощенно трактовать следующим образом. В момент запуска в колебательной системе самопроизвольно возникают слабые свободные колебания, обусловленные включением источников питания, замыканием цепей, скачками токов и напряжений в усилительном приборе и т. д. Благодаря введению цепи положительной ОС часть энергии колебаний с выхода усилителя поступает на его вход. Из-за наличия узкополосной колебательной системы все описанные процессы происходят на одной частоте ω и резко затухают на других частотах.

Вначале, после включения питания генератора, усиление возникшего в колебательной системе сигнала происходит в линейном режиме, а затем, по мере роста амплитуды колебаний, существенную роль начинают играть нелинейные свойства усилительного элемента. В результате амплитуда выходных колебаний генератора достигает некоторого установившегося уровня и потом становится практически неизменной. Энергия, отбираемая от источника постоянного тока усилителем схемы за один период колебаний, оказывается равной энергии, расходуемой за то же время в нагрузке. В этом случае говорят о *стационарном режиме работы генератора*.

Генератор гармонических колебаний (как и колебаний любой формы и частоты) можно представить обобщенной структурной схемой (рис. 6.1), состоящей из нелинейного резонансного усилителя с комплексным коэффициентом усиления $K = K(j\omega)$ и цепи положительной ОС с комплексным ко-

эффицентом передачи по напряжению $\beta = \beta(j\omega)$. В представленной схеме генератора отмечены комплексные амплитуды следующих напряжений: входного — $U_{вх} = U_{вх}(j\omega)$; выходного — $U_{вых} = U_{вых}(j\omega)$ и обратной связи — $U_{ос} = U_{ос}(j\omega)$.

Выражение для напряжения обратной связи на любой частоте генерации ω запишем в виде

$$U_{ос} = U_{вх} = \beta U_{вых}. \quad (6.1)$$

Тогда выходное напряжение определяется как $U_{вых} = KU_{вх}$, или с учетом формулы (6.1), $U_{вых} = K\beta U_{вых}$. Отсюда следует, что автогенератор будет работать в стационарном режиме при условии, когда

$$K\beta = 1. \quad (6.2)$$

Если $K\beta > 1$, то амплитуда выходных колебаний нарастает, что определяет необходимое условие самовозбуждения генератора.

Представим формулу (6.2) следующим образом:

$$K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}\beta(\omega)e^{j\varphi_\beta(\omega)} = K\beta e^{j(\varphi_K + \varphi_\beta)} = 1. \quad (6.3)$$

Здесь показатели $K(\omega) = K$ и $\beta(\omega) = \beta$ — действительные значения коэффициента усиления собственно усилителя (без цепи ОС) и коэффициента передачи цепи положительной ОС; $\varphi_K(\omega) = \varphi_K$ и $\varphi_\beta(\omega) = \varphi_\beta$ — фазовые сдвиги, вносимые соответственно усилителем и цепью положительной ОС на текущей частоте ω .

В теории генераторов (6.3) представляют двумя равенствами:

$$K\beta = K_{ос} = 1; \quad (6.4)$$

$$\varphi_K + \varphi_\beta = 2\pi n, \quad (6.5)$$

где $K_{ос}$ — коэффициент усиления усилителя с цепью положительной обратной связи; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Соотношение (6.4) определяет *условие баланса амплитуд* в автогенераторе. Из него следует, что в стационарном режиме на генерируемой частоте коэффициент усиления усилителя с обратной связью $K_{ос} = 1$.

Равенство (6.5) характеризует *условие баланса фаз*. Оно показывает, что в стационарном режиме суммарные фазовые сдвиги сигнала на частоте генерации, создаваемые усилителем и цепью положительной ОС, должны быть равны нулю или кратны 2π . Следует отметить, что только условие баланса фаз позволяет определить частоту генерируемых колебаний.

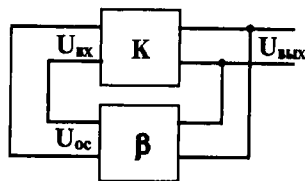


Рис. 6.1. Обобщенная структурная схема генератора

В схемах генераторов гармонических колебаний, работающих в стационарном режиме, соотношения (6.4) и (6.5) выполняются на одной фиксированной частоте ω , которая является *резонансной* для узкополосной колебательной системы. При работе автогенератора негармонических колебаний условия (6.4) и (6.5) должны выполняться для некоторой полосы частот.

В генераторах гармонических колебаний колебательными системами служат резонансные LC -контуры (в СВЧ-генераторах для этих целей используются резонаторные системы) и частотно-зависимые (*фазирующие*) RC -цепи. Генераторы гармонических колебаний с LC -контурами называются *LC-генераторами*, а с фазирующими RC -цепями — *RC-генераторами*. LC -генераторы вырабатывают колебания достаточно высокой частоты (более 100 кГц), а RC -генераторы применяют для создания низкочастотных гармонических колебаний (от долей герц до десятков килогерц).

6.2. Генераторы гармонических колебаний

Генераторы гармонических колебаний для средств измерений выполняются в двух видах: генераторы сигналов (ГС) и генераторы стандартных сигналов (ГСС). ГСС имеют более высокие показатели стабильности частоты и формы, но меньшие уровни сигнала, чем ГС. Отечественные генераторы сигналов маркируются ГЗ, а генераторы стандартных сигналов — Г4.

Обобщенные структурные схемы измерительных генераторов гармонических сигналов типа ГС и ГСС представлены на рис. 6.2.

LC -генераторы

В LC -генераторах, для которых выполняются условия балансов амплитуд и фаз, частота в основном определяется резонансом колебательного контура:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (6.6)$$

Упрощенная схема современного LC -генератора на операционном усилителе — показана на рис. 6.3, а. Усилитель автогенератора охвачен двумя цепями обратной связи, обеспечивающими режимы балансов амплитуд и фаз. Баланс амплитуд устанавливается цепью отрицательной ОС, состоящей из резисторов R_1 и R_2 . С ее помощью задается требуемый коэффициент усиления собственно усилителя $|K| = R_2/R_1$. Баланс фаз обеспечивает цепь положительной ОС, состоящая из резистора R и параллельного колебательного LC -контура. Коэффициент передачи цепи положительной ОС:

$$\beta = \frac{R_0}{R_0 + R}, \quad (6.7)$$

где R_0 — резонансное сопротивление параллельного контура.

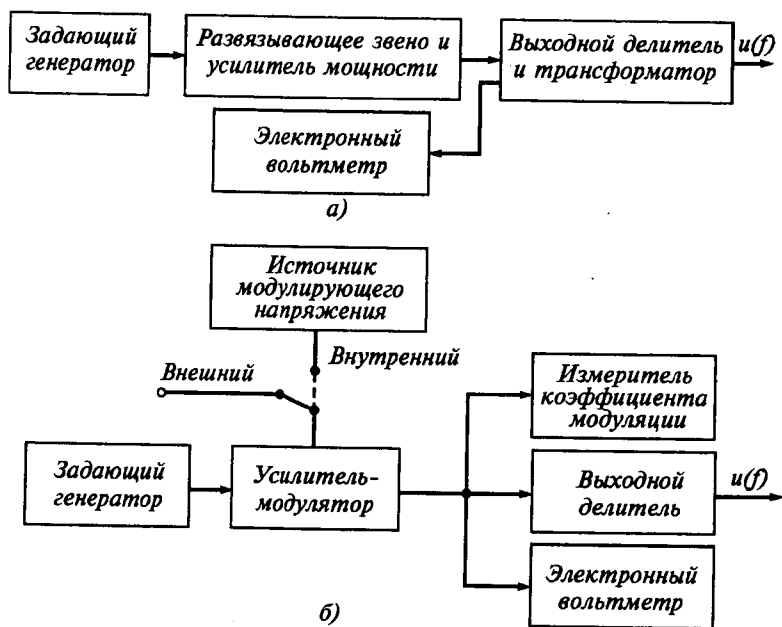


Рис. 6.2. Обобщенные структурные измерительные схемы:
 а — генератора сигнала; б — генератора стандартных сигналов

Кварцевая стабилизация частоты. К LC -генераторам относятся и генераторы с кварцевой стабилизацией частоты. Данный способ стабилизации основан на применении в электрических схемах кварцевого резонатора вместо элементов LC -контуров, что позволяет снизить нестабильность частоты колебаний автогенератора до 10^{-7} (отклонение частоты на $\Delta f = 0,1$ Гц от генерируемой в $f_p = 1$ МГц). Относительная нестабильность частоты в дискретных точках составляет $5 \cdot 10^{-9}$ за 15 мин и $3 \cdot 10^{-8}$ за 16 ч работы генератора.

Кварцевый резонатор (сокращенно *квари*) представляет собой помещенную в *кварцедержатель* тонкую прямоугольную пластинку минерала кварца, грани которой определенным образом ориентированы по отношению к осям кристалла. Из физики известно, что кварц обладает прямым и обратным *пьезоэлектрическим эффектом* (проще, *пьезоэффектом*). Прямой пьезоэффект возникает при механическом сжатии или растяжении кварцевой пластинки и сопровождается появлением на ее противоположных гранях электрических зарядов.

При воздействии на кварцевую пластинку переменного электрического поля в ней возникают упругие механические колебания (*обратный пьезоэффект*), приводящие, в свою очередь, к появлению электрических зарядов на гранях

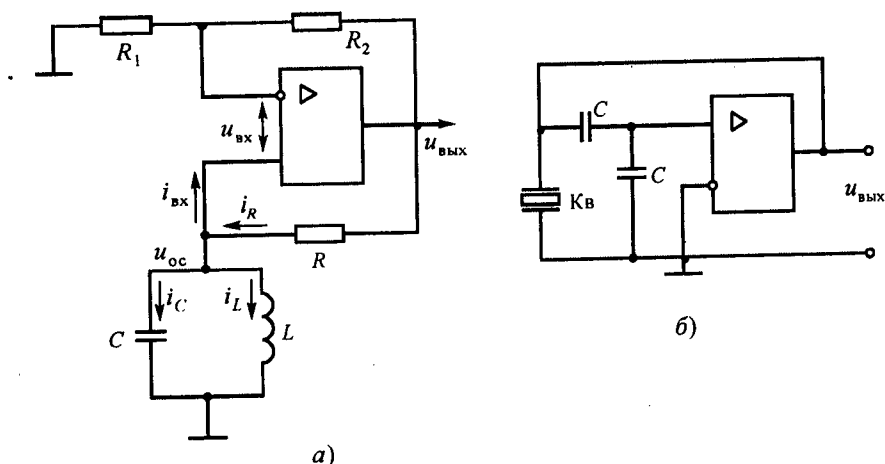


Рис. 6.3. LC -генераторы на ОУ:

a — упрощенная электрическая; $б$ — с кварцевой стабилизацией

пластинки. Кварц можно рассматривать как электромеханическую колебательную систему и сравнивать ее свойства с обычным колебательным LC -контуром. Добротность кварцевого резонатора достигает сотен тысяч, тогда как у колебательного контура она не превышает 300...400. Механическая прочность и слабая зависимость частотных свойств от температуры обуславливают достаточно высокую эталонность частоты кварцевых резонаторов.

На рис. 6.3, $б$ показана упрощенная схема LC -генератора с кварцевой стабилизацией.

Как правило, LC -генераторы предназначены для работы в автоматизированных измерительно-вычислительных комплексах и обеспечивают возможность дистанционного управления частотой и уровнем выходного напряжения посредством команд, передаваемых двоично-десятичным кодом. Диапазон перестройки частоты обычно лежит в пределах от 0,01 Гц до единиц мегагерц, минимальная дискретность ее установки составляет 0,01 Гц.

Пример 6.1. Задана практическая схема автогенератора на высокочастотном ОУ (см. рис. 6.3), работающего в стационарном режиме с циклической частотой выходных колебаний $f_p = 1$ МГц. Определить параметры исследуемой схемы автогенератора, если: $Q = 50$; $L = 75$ мкГ; $K = 1,1$; $R_1 = 10$ кОм.

Решение. Так как в стационарном режиме $K\beta = 1$, и задан $K = 1,1$, то $\beta = 0,91$. Определим параметры данного контура: $C = 1/(4\pi^2 f_p^2 L) = 340$ пФ; $\rho = 2\pi f_p L = 470$ Ом; $R_0 = \rho Q = 23$ кОм. Поскольку $\beta = R_0/(R_0 + R)$, то при значении $\beta = 0,91$ находим, что $R = 2,6$ кОм. Сопротивление резистора R_2 цепи отрицательной ОС находят из формулы для расчета инвертирующего усилителя: $R_2 = |K| R_1 = 1,1 \cdot 10 = 11$ кОм.

RC-генераторы

Технические характеристики *LC*-генераторов в диапазонах достаточно низких частот существенно ухудшаются из-за резкого возрастания величин индуктивностей и емкостей колебательных контуров и соответствующих им размеров катушек индуктивностей и конденсаторов. Кроме того, их трудно перестраивать по частоте в широких пределах. Поэтому в низкочастотных измерительных генераторах гармонических колебаний в качестве колебательных систем и цепей положительной ОС используют частотно-избирательные *RC*-цепи. Такие генераторы называют *RC*-генераторами.

Обычно в *RC*-генераторах включают мост Вина (рис. 6.4, *а*), который осуществляет сдвиг фазы сигнала обратной связи на 180° .

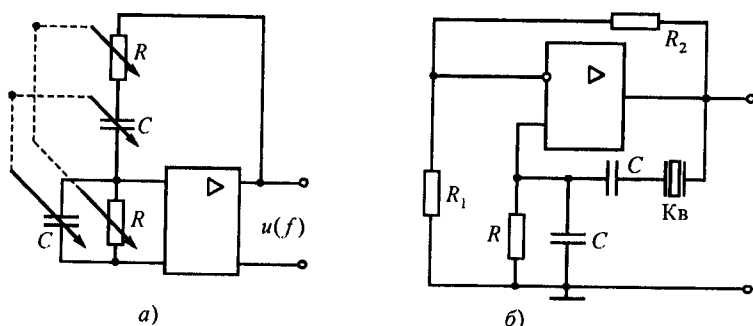


Рис. 6.4. Схемы *RC*-генераторов с мостом Вина:
а — обычная; *б* — кварц включен в мост Вина в качестве сопротивления

Схема генератора строится на основе усилителя, у которого в широком диапазоне частот коэффициент передачи — вещественная величина, а фазовый сдвиг $\varphi = 2\pi$ обеспечивается за счет моста Вина и инверсии сигнала в каскадах усиления.

Частота гармонических колебаний в *RC*-генераторе с мостом Вина:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (6.8)$$

На рис. 6.4, *б* изображена упрощенная схема *RC*-генератора с мостом Вина, в котором вместо одного из резисторов включен кварцевый резонатор, работающий в режиме резонанса напряжений.

Характеристики генераторов звуковых частот

Генераторы звукового диапазона частот (низкочастотные генераторы) имеют обычно значительный уровень мощности выходного сигнала — до 5...10 Вт.

Однако такая мощность может выделяться только на согласованной нагрузке, поэтому на выходе генератора часто включают согласующий трансформатор, например, на нагрузки 60, 600, 6000 Ом. Показания электронного вольтметра выходного напряжения будут правильными тоже только при согласованной нагрузке генератора. Погрешность установки частоты генератора можно снизить до величины, меньшей одного процента, ее нестабильность — того же порядка. Повышают стабильность частоты путем применения прецизионных внешних элементов (конденсаторов, индуктивностей и резисторов).

В задающих генераторах звуковых частот используются три метода генерирования:

- прямой;
- метод биений;
- метод электронного моделирования.

В генераторе, показанном на рис. 6.3, *а*, используется прямой метод генерации.

Для повышения стабильности частоты звуковых генераторов часто приме-

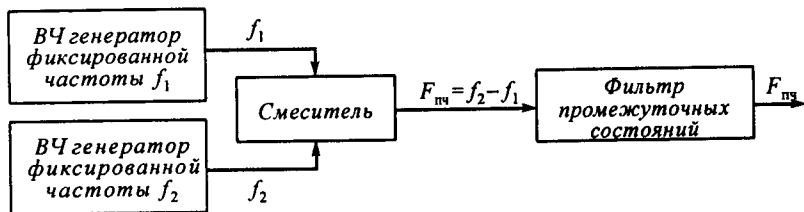


Рис. 6.5. Структурная схема измерительного генератора на биениях

няют задающие генераторы на биениях. Структурная схема задающего генератора содержит два первичных высокочастотных генератора фиксированных частот f_1 и f_2 , смеситель и фильтр промежуточной частоты (рис. 6.5).

Метод биений заключается в том, что колебания звуковой частоты образуются в результате воздействия на нелинейный элемент смесителя двух близких по частоте гармонических колебаний f_1 и f_2 . При этом частота f_2 может меняться в пределах от f_1 до $f_1 + F$, где F — наибольшая частота рабочего диапазона. На выходе смесителя получают комбинационные частоты, в том числе и так называемую *промежуточную частоту* $F_{пч} = f_2 - f_1$. Колебание промежуточной частоты $F_{пч}$ выделяется фильтром промежуточной частоты.

При разработке измерительных генераторов на биениях принимают меры, направленные на обеспечение высокой стабильности частоты первичных генераторов колебаний. Как правило, предусматривают возможность периодической калибровки частоты генератора. Коэффициент нелинейных искажений генерируемых колебаний обычно составляет десятки доли процента и в основном определяется качеством фильтра промежуточной частоты.

Метод электронного моделирования используют для получения гармонических колебаний инфранизкой частоты.

Генератор инфранизких частот может быть построен по обобщенной структурной схеме (рис. 6.6) с электронным управлением частотой. Такие устройства принято называть функциональными генераторами.

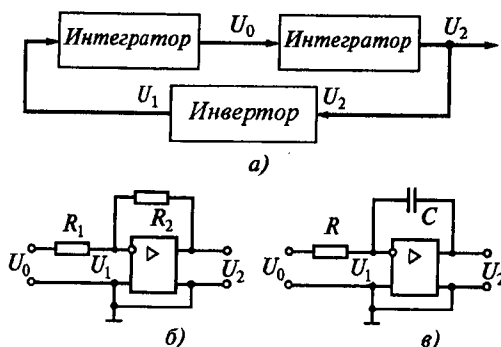


Рис. 6.6. Структурные схемы колебательного звена:
а — электронная модель; б — усиливающая; в — интегрирующая

Задающей генератор представляет собой электронную модель колебательного звена. Основным элементом электронной модели колебательного звена является интегратор, построенный на усилителе постоянного тока — операционном усилителе. Интегратор, как правило, представляет собой запоминающее звено. На рис. 6.6, а показана структурная схема электронной модели колебательного звена, включаемого в цепь положительной обратной связи автогенератора инфранизких частот. Электронная модель содержит два последовательных включенных интегратора и инвертор в виде усилителя. Усилительное и интегрирующие звенья функционального генератора представлены на рис. 6.6, б, в.

Характеристики высокочастотных генераторов

В диапазоне радиочастот в средствах измерений используются как генераторы сигналов, так и генераторы стандартных сигналов. Генераторы сигналов имеют большую среднюю выходную мощность (до 3 Вт) и используются для питания измерительных передающих антенн и других мощных устройств. Генераторы стандартных сигналов — маломощные источники с низким уровнем выходного напряжения (до 1 В) — применяют при испытаниях и настройке узлов радиоаппаратуры. Основные требования, предъявляемые к ГСС: высокие стабильность частоты и амплитуды выходного сигнала, малый коэффициент нелинейных искажений.

В генераторах стандартных сигналов предусматривается возможность получения амплитудной модуляции за счет использования как внешнего, так и

внутреннего источников напряжения. Внутренняя модуляция обычно действует на частотах 400 и 1000 Гц.

Генераторы сверхвысоких частот

Генераторы сверхвысоких частот (СВЧ-генераторы) работают в диапазоне частот 1...40 ГГц. По типу выходного соединителя с исследуемой схемой они делятся на коаксиальные и волноводные, причем последние более высокочастотные. Для СВЧ-генераторов характерно однодиапазонное построение, с небольшим перекрытием по частоте (около октавы — 2 раза). Некалиброванная выходная мощность измерительного СВЧ-генератора — несколько Вт, а калиброванная достигает нескольких мкВт. Шкалы калиброванных аттенуаторов СВЧ-генераторов градуируют в дБ, а ГСС — в дБ и мкВт.

Генераторы сверхвысоких частот используют для настройки радиоприемных устройств радиолокационных и радионавигационных станций, систем космической связи и спутникового вещания, измерения параметров антенн и т. д. Обобщенная структурная схема генератора СВЧ показана на рис. 6.7.

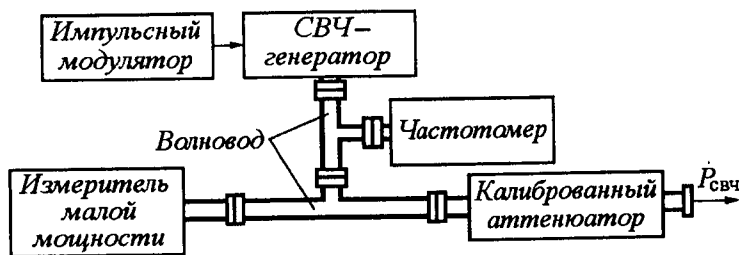


Рис. 6.7. Структурная схема генератора сверхвысоких частот

Особенностями измерительных генераторов этого вида являются относительная простота электронной части схемы и сложность механических узлов приборов. Схема генератора СВЧ включает собственно СВЧ-генератор, импульсный модулятор, измеритель малой мощности, частотомер и калиброванный аттенуатор. Все высокочастотные узлы генератора соединяются волноводами.

Задающие СВЧ-генераторы измерительных приборов выполняют на отражательных клистронах с внешним или внутренним резонатором, на диодах Ганна, магнетронах, лавинно-пролетных диодах (ЛПД) или на лампах обратной волны (ЛОВ).

В измерительных СВЧ-генераторах необходима тщательная экранировка, так как утечка мощности с ростом частоты возрастает. Провода питания выполняются в виде коаксиальных кабелей со специальным наполнением, хорошо поглощающим энергию СВЧ-колебаний. Повышенные требования предъявляют и к источникам питания, так как активные элементы СВЧ-диапазона чувствительны к нестабильности питающих напряжений.

6.3. Цифровые измерительные генераторы низких частот

Цифровые генераторы низких частот по сравнению с аналоговыми характеризуются более эффективными метрологическими характеристиками: высокими точностью установки и стабильностью частоты, малым коэффициентом нелинейных искажений (строго синусоидальной формой), постоянством уровня выходного сигнала. Цифровые генераторы, получающие все более широкое распространение, удобнее аналоговых в эксплуатации: выше быстродействие, существенно проще установка требуемой частоты, более наглядная индикация. Кроме того, цифровые генераторы имеют возможность автоматической перестройки частоты по заранее заданной программе и применения в сочетании с цифровыми средствами обработки информации.

Действие цифровых генераторов основано на принципе формирования числового кода с последующим преобразованием его в аналоговый гармонический сигнал. Последний аппроксимируется функцией, моделируемой с помощью ЦАП.

Принципы аппроксимации

Самый простой вид аппроксимации — ступенчатая. Она заключается в представлении (замене) синусоидального колебания напряжением ступенчатой формы, весьма мало отличающейся от синусоидальной кривой (рис. 6.8, а).

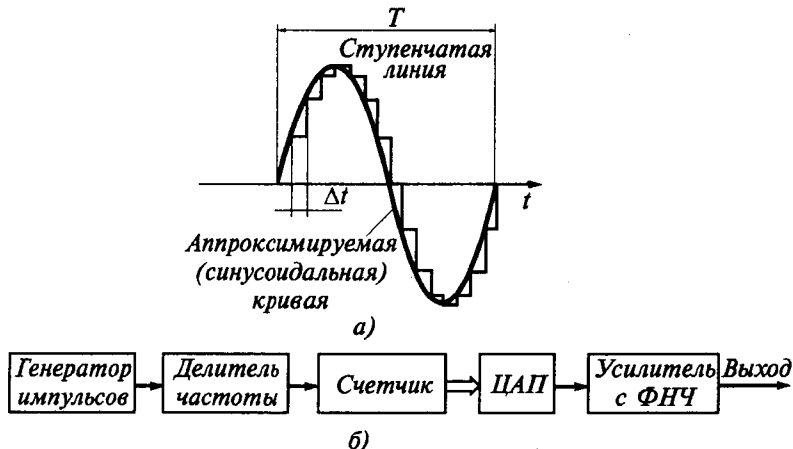


Рис. 6.8. Цифровой генератор низких частот:
а — ступенчатая аппроксимация; б — упрощенная структурная схема

Аппроксимируемое гармоническое напряжение $u(t) = U_m \sin \omega t$ дискретизируется во времени (равномерная дискретизация с шагом Δt) и в интервале, разделяющем два соседних момента времени t_i и t_{i+1} , синусоидальное

колебание заменяется напряжением постоянного тока — ступенькой, высота которой равна значению аппроксимируемого напряжения в момент t_i , т.е. $u(t_i) = U_m \sin \omega t_i$. В результате такой замены вместо кривой синусоидальной формы получается ступенчатая линия, изображенная на рис. 6.8, а.

При имеющемся периоде T гармонического колебания число ступенек p , приходящихся на один период, определяется шагом дискретизации: $p = T/\Delta t$. Если же из технических соображений число ступенек задано, то изменение шага дискретизации приводит к изменению периода формируемого напряжения, поскольку $T = p\Delta t$.

Учитывая, что $t_i = i\Delta t$, уравнение ступенчатой кривой можно представить в виде $u(i\Delta t) = U_m \sin(i\omega\Delta t)$ или с учетом значения p и соотношения $\omega = 2\pi/T$ записать в следующем виде:

$$u(i\Delta t) = U_m \sin(i2\pi/p). \quad (6.9)$$

Кроме того, ступенчатая кривая тем точнее приближается по форме к синусоиду (уменьшается погрешность аппроксимации), чем больше выбрано число ступеней p . Когда это число достаточно велико, сформированное ступенчатое напряжение можно рассматривать как низкочастотное синусоидальное напряжение, искаженное в небольшой степени высокочастотной аддитивной помехой.

Спектральный анализ напряжения, полученного путем ступенчатой аппроксимации, показывает, что его спектр содержит гармонику основной частоты и ряд высших гармоник. При этом оказывается, что ближайшей к основной высшей гармоникой будет составляющая с номером $p - 1$, следующей — гармоника номера $p + 1$, затем гармоники номеров $2p - 1$ и $2p + 1$ и т.д. Например, при $p = 25$ и частоте напряжения f основной гармоники ближайшими высшими гармониками будут 24-я, 26-я и 49-я, 51-я гармоники, т.е. напряжения частот $24f$, $26f$, $49f$, $51f$. Такие соотношения между основной и высшими гармониками позволяют просто осуществить высококачественную фильтрацию, резко ослабляющую уровни высших гармоник, т.е. получить синусоидальное напряжение, характеризующееся достаточно малым коэффициентом нелинейных искажений.

Упрощенная структурная схема цифрового генератора, формирующего ступенчатую кривую напряжения, приведена на рис. 6.8, б. Импульсный кварцевый генератор вырабатывает периодическую последовательность коротких импульсов с периодом следования T . На выходе делителя частоты с регулируемым коэффициентом деления g получается периодическая последовательность импульсов с периодом следования $\Delta t = gT$, задающим шаг дискретизации. Импульсы поступают в счетчик емкостью p . Кодовая комбинация, определяемая числом i импульсов, накопленных в счетчике, передается в схему ЦАП. Последний вырабатывает напряжение, соответствующее числу i , т.е. $u(i\Delta t) = U_m \sin(i2\pi/p)$. Таким образом формируются p ступенек аппроксимируемой кривой. После накопления p импульсов счетчик переполняется

и сбрасывается в нуль. С приходом $(p + 1)$ -го импульса начинается формирование нового периода ступенчатой кривой.

Частоту формируемого колебания при фиксированном числе ступенек p регулируют, изменяя шаг дискретизации Δt , что достигается изменением коэффициента деления g делителя частоты.

6.4. Генераторы качающейся частоты и сигналов специальной формы

В измерительной технике часто используются источники гармонических сигналов, частота которых автоматически изменяется в пределах заданной полосы частот.

Генераторы качающейся частоты

К генераторам качающейся частоты (ГКЧ — его устаревшее название свип-генератор) относятся источники гармонических колебаний со специальным (линейным, логарифмическим и т. д.) законом автоматического изменения частоты в пределах заданной полосы качания. Полоса качания Δf определяется как разность конечного f_k и начального f_n значений частоты, т.е. $\Delta f = f_k - f_n$. В зависимости от ее значения ГКЧ делятся на узкополосные (Δf не более 1 % максимальной частоты рабочего диапазона или поддиапазона), широкополосные ($\Delta f > 1$ %) и комбинированные.

Упрощенная структурная схема ГКЧ (рис. 6.9) содержит источник модулирующего напряжения, задающий генератор, схему формирования частотных меток, выходной блок и цифровой индикатор уровня, фиксирующий выходное колебание.

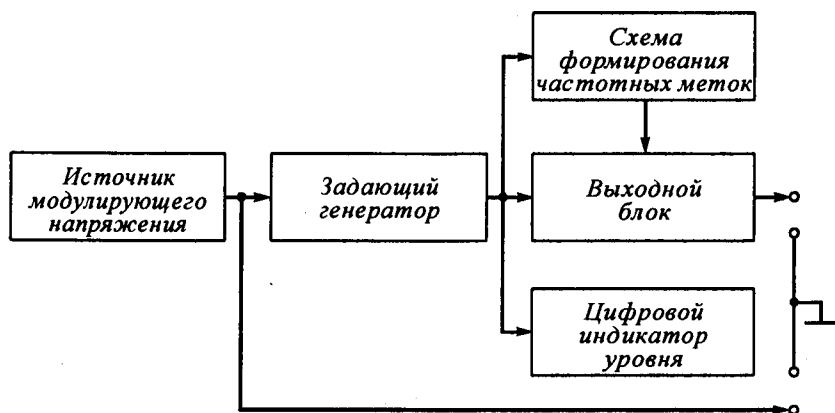


Рис. 6.9. Упрощенная структурная схема генератора качающейся частоты

Основными параметрами данных генераторов являются частотные и амплитудные показатели. К первым относят диапазон рабочих частот, полосу качания, длительность автоматического качания частоты, нелинейность ее перестройки и т. д. Ко вторым — уровень выходной мощности (напряжения) при работе на согласованную нагрузку, неравномерность этого уровня при перестройке частоты и прочее. К генераторам качающейся частоты предъявляются достаточно жесткие требования по линейности модуляционной характеристики, постоянству выходного уровня мощности и значению побочной модуляции.

Генераторы качающейся частоты строятся по прямому методу генерации и методу биений. В диапазоне от десятых и даже сотых долей герц до десятков мегагерц используют функциональные генераторы (рис. 6.6) с электронным управлением частотой. При этом частоту таких генераторов можно регулировать, изменяя ток заряда (разряда) емкости интегратора. При наличии преобразователей цифровых кодов в сигналы управления исполнительными элементами, возможно дистанционное и программное изменение частоты.

В достаточно широких пределах автоматическое качание частоты без коммутации элементов колебательной системы легко реализуют в низкочастотных генераторах на биениях. При этом в качестве перестраиваемого гетеродина может служить LC -генератор с электронным управлением частотой.

В настоящее время разработаны несколько способов управления частотой высокочастотных LC -генераторов. Практическое применение находит способ перестройки частоты путем изменения величины барьерной емкости p - n -перехода полупроводникового диода — варикапа. Емкость его p - n -перехода полностью или частично включается в цепь колебательного контура генератора. Модулирующее напряжение, воздействуя на диод изменяет его барьерную емкость, а, следовательно, и частоту генерируемых колебаний.

В области СВЧ генераторы качающейся частоты строят на маломощных клистродах, диодах Ганна и лампах обратной волны (ЛОВ).

При использовании клистронов линейная частотная модуляция колебаний достигается за счет использования пилообразного напряжения, подаваемого на один из его электродов (отражатель). Максимальная девиация частоты ограничивается диапазоном электронной перестройки частоты клистрода. К недостаткам ГКЧ на клистродах следует отнести наличие побочной амплитудной модуляции, возникающей из-за непостоянства выходной мощности в пределах зоны генерации.

Возможность электронной перестройки частоты генераторов СВЧ на диодах Ганна появляется из-за их свойства изменять свою эквивалентную емкость под влиянием приложенного напряжения. Частотная модуляция колебаний ЛОВ осуществляется пилообразным напряжением, подводимым к ускоряющему электроду. Недостатком ЛОВ, так же как и клистрода, является наличие побочной амплитудной модуляции. Кроме того, задающий

генератор на ЛОВ имеет более громоздкую конструкцию и требует более сложных источников питания.

Генераторы специальной формы

К генераторам специальной формы относятся источники одиночных или периодических импульсных сигналов, форма которых может быть и прямоугольной, и отличной от нее. Рассмотрим функциональные генераторы, которые в широком диапазоне частот могут генерировать синусоидальное и пилообразное напряжение, а также импульсное напряжение треугольной, прямоугольной и других специальных форм. Генераторы этого типа допускают плавную регулировку частоты колебаний в пределах от сотых долей герц до единиц мегагерц. Имеется возможность модулировать (применяется и термин «свиппировать») частоту колебаний напряжением от внешнего источника. Генераторы этого типа достаточно стабильны и просты в обслуживании.

Поскольку основным элементом функционального генератора является интегратор на ОУ, то частоту колебаний на выходе прибора можно регулировать, изменяя значение тока в зарядной (входной) RC -цепи интегратора. В генераторах предусматривается возможность регулировки симметричности формы выходного напряжения. В результате можно формировать треугольное напряжение с разным наклоном сторон или несимметричное прямоугольное напряжение. При наличии интерфейса функциональные генераторы можно использовать в составе автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов и измерительных систем. При этом все параметры выходных сигналов устанавливают дистанционно.

Особое место в ряду генераторов специальной формы занимают импульсные (релаксационные) генераторы. Они подразделяются на генераторы периодической последовательности импульсов и генераторы кодовых групп импульсов. Широкое применение находят генераторы периодических последовательностей прямоугольных импульсов.

Реальная форма импульса несколько отличается от прямоугольной, как это показано на рис. 6.10. Однако эти отклонения не должны превышать параметров, указанных в технической документации.

Обычно прямоугольные импульсы характеризуются следующими основными параметрами: амплитудным

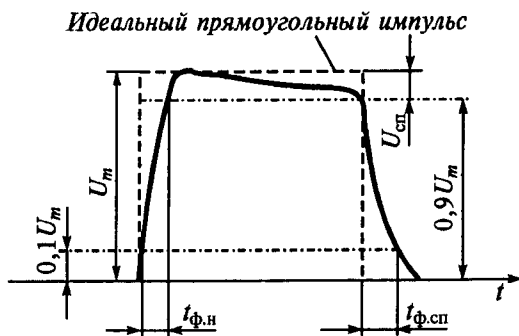


Рис. 6.10. Параметры реального прямоугольного импульса

значением U_m и напряжением спада вершины $U_{сп}$, которое не превышает $0,05U_m$; длительностью фронта нарастания $t_{ф.н}$ — интервал времени, в течение которого мгновенное значение вырастает от 0,1 до 0,9 амплитудного U_m (это время составляет 0,1...0,2 длительности импульса); $t_{ф.сп}$ — длительностью фронта спада — время спада напряжения от 0,9 до 0,1 U_m (это время составляет 0,2...0,3 длительности импульса). Естественно, что главный параметр импульса — длительность.

Для формирования прямоугольных импульсов со стабильными длительностью и частотой следования, крутыми фронтами и плоской вершиной используют блокинг-генераторы и мультивибраторы, работающие в автоколебательном и ждущем режимах. В мультивибраторах применяется кварцевая стабилизация частоты.

Упрощенная структурная схема импульсного генератора и временные диаграммы ее работы показаны на рис. 6.11.

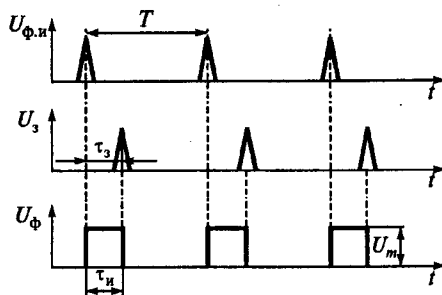
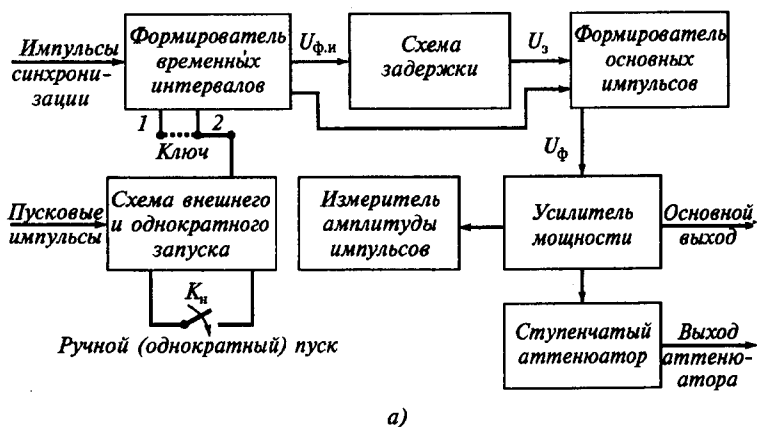


Рис. 6.11. Импульсный генератор:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

Формирователь временных интервалов может работать в режиме автогенератора (положение ключа 1) или в ждущем режиме (положение ключа 2). Однократный пуск осуществляют нажатием кнопки K_n . Интервал T определяет частоту следования импульсов $f=1/T$. Длительность импульсов определяется временем задержки, как в одноименной схеме: $\tau_n = \tau_z$.

По длительности прямоугольных импульсов импульсные генераторы делятся на микросекундные и наносекундные. Классы точности импульсных генераторов устанавливаются отдельно по амплитуде, частоте следования и длительности импульса. Кроме того, в документации указываются $t_{ф.н}$ и $t_{ф.сп}$. Классы точности по амплитудному значению устанавливаются как приведенная погрешность, а по остальным параметрам как относительная погрешность от измеряемой величины. Причем погрешности установки временных параметров в среднем достигают нескольких процентов. Обозначение отечественных генераторов периодических прямоугольных импульсов — Г5.

Современные генераторы сигналов специальной формы относятся к универсальным измерительным приборам с широким частотным диапазоном, большим числом форм выходных сигналов и электронным управлением параметрами сигналов. В ряде случаев эти генераторы частично или полностью заменяют низкочастотные, в том числе инфранизкочастотные, высокочастотные и импульсные генераторы.

6.5. Генераторы шумовых сигналов

Генераторы шумовых сигналов (шумовые генераторы) вырабатывают флуктуационные напряжения с определенными (заданными) вероятностными характеристиками.

Основной узел шумового генератора — задающий генератор (рис. 6.12). Его сигналы должны иметь равномерную спектральную плотность мощности по всей требуемой полосе частот (теоретически это *белый шум*). В задающем генераторе используются физические явления, при которых возникают достаточно интенсивные шумы со статическими характеристиками и параметрами, поддающимися достаточно несложному математическому анализу.

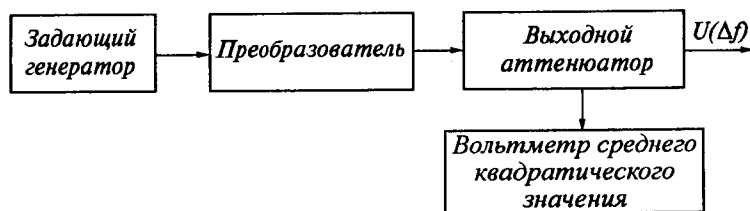


Рис. 6.12. Структурная схема шумового генератора

Источники теплового шума

Нагретый проволочный резистор. В качестве образцового источника шума может служить нагретый проволочный резистор, среднее квадратическое значение напряжения на котором рассчитывается по формуле:

$$U^2 = 4kTR\Delta f, \quad (6.10)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура резистора в градусах Кельвина; R — сопротивление резистора; Δf — полоса пропускания.

Конструктивно резистор выполняется в виде вольфрамовой спирали, намотанной на керамический каркас, температура которой поддерживается постоянной.

Болометрический генератор шума. К источникам тепловой шумовой мощности относится и болометрический генератор. *Болометр* представляет собой вакуумный стеклянный баллон, внутри которого натянута вольфрамовая нить.

Источники теплового шума используются в качестве образцовых генераторов шумовых напряжений, так как расчетные данные хорошо совпадают с практическими результатами.

В шумовых генераторах также применяются фотоэлектронные умножители, газоразрядные трубки, шумовые диоды и т. п.

Газоразрядные источники

Газоразрядные генераторы шума. Широкое применение в качестве первичного источника шума в сантиметровом диапазоне волн нашли газоразрядные шумовые трубки (ГШТ) с положительным столбом. Газоразрядные шумовые трубки имеют высокую равномерность спектральной плотности мощности шума в широкой полосе частот, стабильный и относительно высокий уровень мощности, просты в эксплуатации, устойчивы к жестким воздействиям внешней среды и обладают достаточно высокой эксплуатационной надежностью.

Газоразрядный шумовой генератор выполнен в виде стеклянной трубки, наполненной инертным газом (аргоном или неоном) до давления от сотен до тысяч паскалей. На одном конце трубки расположен прямонакальный, или подогреваемый катод, на противоположном — анод. Свойство газоразрядных трубок генерировать шумы обусловлено колебаниями электронов в плазме. Для практического использования шумового излучения положительного столба ГШТ помещают в специальные генераторные секции. В зависимости от диапазона частот и типа трубки могут быть использованы генераторные секции, выполненные на волноводе, коаксиальной или полосковой линии.

Волноводные шумовые генераторы представляют собой отрезок волновода, в центре широкой стенки которого под малым углом

(7...15°) помещается ГШТ. Наклонное положение трубки в волноводе обеспечивает при разряде равномерное внесение потерь на достаточной длине линии, благодаря чему достигается удовлетворительное согласование ГШТ с линией передачи в широком диапазоне частот.

Разработка генераторов шума в коротковолновой части миллиметровых волн сопряжена с большими трудностями из-за малого диаметра и толщины стенок ГШТ. В связи с этим шумовые генераторы миллиметрового диапазона изготавливают пакетированными без возможности в процессе эксплуатации производить смену ГШТ.

В длинноволновой части сантиметровых волн из-за сложности согласования трубки с линией передачи обычно применяют коаксиальные или полосковые генераторы шума.

В коаксиальных генераторах шума ГШТ помещают внутри ленточной спирали, которая является внутренним проводником коаксиальной линии. Внешним проводником служит цилиндрическая поверхность корпуса линии. Форма спирали (зазор между соседними витками, диаметр спирали) определяется исходя из требуемого волнового сопротивления, связи трубки с линией передачи, диапазона частот.

Полосковые генераторы шума представляют собой симметричную полосковую линию, вдоль оси которой помещается газоразрядная шумовая трубка.

Интенсивность излучения ГШТ определяется главным образом электронной температурой плазмы. Потери, вносимые генератором шума в тракт, в выключенном состоянии в основном определяются потерями в стенке трубки, линии передачи и в присоединительных элементах.

На практике часто требуется использовать генераторы шума в импульсном режиме. Длительность импульса горения ГШТ ограничена снизу длительностью переходного процесса в газовом разряде. В зависимости от допустимых искажений минимальная длительность модулирующего импульса может составлять 0,2...1 мс.

Генераторы шума на полупроводниковых приборах

Генераторы на лавинно-пролетных диодах. Из генераторов шума на полупроводниковых приборах наибольшее применение в практике измерений находят генераторы на лавинно-пролетном диоде (ЛПД). Конструктивно они состоят из ЛПД и генераторной секции, служащей для согласования входного сопротивления p - n -перехода с сопротивлением нагрузки. Основным источником шумового излучения в ЛПД являются дробовые флуктуации тока насыщения диода.

Лавинно-пролетные диоды имеют резкую зависимость полного сопротивления p - n -перехода в рабочем режиме от частоты и тока диода. Это затрудняет согласование диода с высокочастотным трактом в широкой полосе частот.

При создании генераторов шума на ЛПД эти особенности учитываются соответствующим выбором тока диода, коэффициента передачи, напряжения пробоя и прочее.

Генераторы шума на ЛПД перекрывают дециметровый и сантиметровый диапазоны волн. Они могут работать как в режиме непрерывных колебаний, так и в режиме импульсной модуляции при длительности импульсов от нескольких долей микросекунд и более.

Отечественные низкочастотные генераторы шумов обозначаются как Г2, работают в диапазоне от 20 Гц до 10 МГц и вырабатывают мощность до 5 Вт. СВЧ-генераторы имеют высшую частоту рабочего диапазона до 37 ГГц, и как и генераторы гармонических колебаний, выполняются однодиапазонными с малым перекрытием по частоте. Обозначаются шумовые СВЧ-генераторы так же как и низкочастотные — Г2.

В качестве преобразователей спектра в шумовых генераторах применяются усилители, фильтры, ограничители, генераторы перестраиваемой частоты — в зависимости от того, какое преобразование шума требуется. Так, применив в качестве преобразователя фильтр с определенным коэффициентом передачи, можно получить из генератора белого шума генератор стационарного случайного процесса со спектральной плотностью мощности, изменяющейся по заданному закону в определенном диапазоне частот. Основным элементом выходного устройства генератора служит калиброванный аттенюатор, обеспечивающий одинаковый коэффициент деления мощности по всей полосе частот шума. Для контроля уровня выходной мощности в схему генератора встраивается вольтметр среднего квадратического значения.

6.6. Генераторы шумоподобных сигналов

В настоящее время в теоретической радиотехнике, системах передачи информации и, особенно, системах мобильной связи усиленно внедряются сигналы с заданными корреляционными и спектральными свойствами. Эти сигналы имеют спектральные характеристики, близкие к белому (квазibelому) шуму в широкой полосе частот. Подобные сигналы принято называть *шумоподобными (широкополосными) сигналами (ШПС), сигналами без несущей или сигналами с рассеянным спектром*. Структура шумоподобных сигналов хорошо приспособлена для цифровых систем связи. Шумоподобные сигналы, во-первых, позволяют уплотнить перегруженный частотный диапазон, а во-вторых, обеспечивают скрытность передачи информации или абонентских переговоров.

В связи с отмеченным, в контрольно-измерительных устройствах все более широкое распространение получают измерительные широкополосные (шумовые) генераторы, выполняемые на элементах цифровой техники. По сравнению с генераторами, в основе которых лежат физические приборы, в

подобных генераторах используются программные пакеты, и поэтому они обладают рядом достоинств. К ним относятся возможность точного контроля частоты и точного определения статистических характеристик генерируемого сигнала, постоянство его средней мощности во времени и в широкой полосе частот, отсутствие дрейфа и т.д.

Если рассматривать последовательности из $n = M$ двоичных импульсов прямоугольной формы, которые в соответствии с номером позиции M могут принимать значения ± 1 (иногда — 1 и 0), то простым перебором можно найти такие последовательности, для которых

$$\frac{E}{E_1} = n, \quad (6.11)$$

где E — энергия всей импульсной последовательности, E_1 — энергия одного импульса.

Последовательность класса шумоподобных сигналов повторяется через период $T = n\Delta t = (2^m - 1)\Delta t$, где $\Delta t = 1/F_c$ — интервал следования сдвигающих импульсов (рис. 6.13,а), или длительность одного элемента (F_c — частота следования последовательности). Например, изображенная на рис. 6.13,б псевдослучайная двоичная последовательность, имеет период, содержащий 8 элементов.

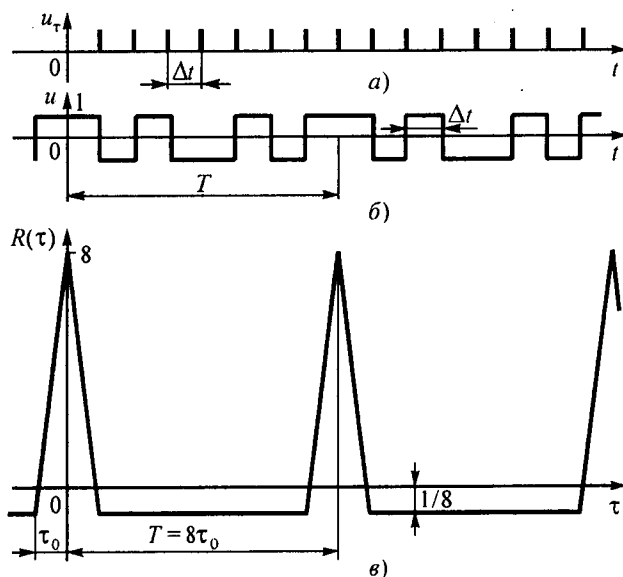


Рис. 6.13. Восьмизлементный шумоподобный сигнал: а — сдвигающие импульсы; б — диаграмма функции; в — АКФ.

Вследствие кусочно-постоянного характера двоичного псевдослучайного сигнала его автокорреляционная функция (АКФ) изменяется линейно в интервале дискретизации Δt . Если бы сигнал был действительно случайным, то он бы характеризовался дельта-функцией — АКФ белого шума. У двоичной псевдослучайной последовательности АКФ имеет вид, изображенный на рис. 6.13,в. Она отличается наличием ненулевого смещения.

Наиболее распространенным примером технической реализации шумоподобных сигналов (сигнальной конструкции) могут служить сформированные определенным образом псевдослучайные последовательности прямоугольных радиоимпульсов, в частности, при манипуляции несущего колебания двоичными кодами. При этом наиболее успешно развиваются цифровые методы генерации сигналов на основе дискретных ортогональных сигналов в виде линейных M -последовательностей, функций Уолша и др.

Линейные двоичные M -последовательности

Шумоподобный сигнал генерируется в виде двоичной последовательности импульсов, причем переключение с одного элемента на другой, которое может быть дискретным во времени и происходить через равные интервалы Δt , выполняются псевдослучайным образом. Поэтому длительность существования уровней 1 или -1 псевдослучайна. Для линейной двоичной псевдослучайной M -последовательности характерно следующее.

1. Отношение уровня главного максимума к максимальному значению боковых лепестков АКФ приближенно растет как $\sqrt{n}$, где $n = M = 2^m - 1$ — число импульсов в последовательности; m — целое положительное число.

2. Она может быть сформирована регистром сдвига на m разрядов.

3. Автокорреляционная функция M -последовательности имеет форму, сходную с АКФ квазيبелого шума с ограниченным спектром.

4. Спектр мощности линейчатый с огибающей, описываемой функцией $[(\sin \pi f \Delta t) / (\pi f \Delta t)]^2$. Расстояние по оси частот между соседними спектральными линиями составляет $\Delta f = 1/(M \Delta t) = F_c/M$. Первый нуль огибающей расположен в точке $F_c = 1/\Delta t = M \Delta f$, второй — в точке $2F_c = 2/\Delta t$ и т.д., причем 92 % мощности сигнала заключено в полосе от 0 до F_c . Постоянная составляющая равна $1/M$.

5. Среди элементов найдутся любые комбинации из $+1$ и -1 , состоящие из m членов (кроме запрещенной комбинации, включающей только $+1$).

Функции Уолша

Система функций (последовательностей) Уолша (Walsh) на отрезке своего существования (периоде следования $-\Delta t/2, \Delta t/2$) принимают лишь два значения: $+1$ или -1 .

Введем безразмерное время, нормированное к периоду следования $\theta = t/T$, и обозначим k -ю (k — порядок) функцию Уолша символом $wal(k, \theta)$.

Существует большое число функций Уолша, которые нумеруются (упорядочиваются) различными способами. Идею построения последовательностей Уолша можно уяснить из рис. 6.14, где показаны первые восемь функций.

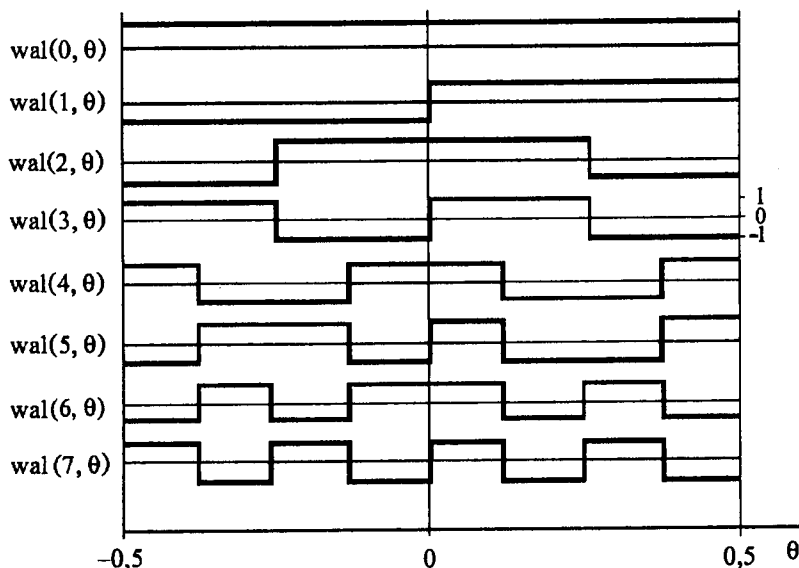


Рис. 6.14. Восемь первых функций Уолша

Ортонормированность данных функций следует из принципа их построения, и может быть проверена непосредственно путем вычисления интеграла. Система $wal(k, \theta)$ позволяет продемонстрировать наиболее важные свойства функций Уолша, которые определяются следующим разностным (рекуррентным) уравнением:

$$wal(2k + p, \theta) = (-1)^{[k/2] + p} [wal(k, 2\theta + 0,5) + (-1)^{k+p} wal(k, 2\theta - 0,5)], \quad (6.12)$$

где обозначение $[k/2]$ представляет собой наибольшее целое число, меньшее или равное $k/2$; параметр p может принимать только два значения: 1 или 0.

Функции Уолша нормированы к единице при любом порядке k :

$$\|wal(k, \theta)\|^2 = \int_{-1/2}^{1/2} wal^2(k, \theta) d\theta = 1. \quad (6.13)$$

При перемножении двух функций Уолша получается также функция Уолша (свойство мультипликативности):

$$\text{wal}(k, \theta)\text{wal}(n, \theta) = \text{wal}(m, \theta), \quad (6.14)$$

где m — порядок функции является суммой порядков k и n по mod 2 (читается «по модулю два» и обозначается $m = k \oplus n$) (напомним, что при суммировании «по модулю два» сумма различных символов равна единице, а сумма одинаковых символов равна нулю: $1 \oplus 0 = 1$; $0 \oplus 1 = 1$; $0 \oplus 0 = 0$; $1 \oplus 1 = 0$).

По существу, чтобы проделать такое сложение для функций Уолша, следует представить числа k и n в двоичной форме и сложить их без переносов в старшие разряды согласно правилу:

$$1 \oplus 0 = 1; 0 \oplus 1 = 1; 0 \oplus 0 = 0; 1 \oplus 1 = 0.$$

Умножение функции Уолша самой на себя дает функцию нулевого порядка, так как результатом являются произведения вида $(+1)(+1)$ и $(-1)(-1)$:

$$\text{wal}(k, \theta) \text{wal}(k, \theta) = \text{wal}(0, \theta). \quad (6.15)$$

Также нетрудно показать, что умножение функции любого порядка $\text{wal}(k, \theta)$ на функцию нулевого порядка $\text{wal}(0, \theta)$ оставляет первую без изменения:

$$\text{wal}(k, \theta)\text{wal}(0, \theta) = \text{wal}(k, \theta). \quad (6.16)$$

В общем случае по рассмотренной системе базисных функций Уолша любую интегрируемую на интервале $0 \leq \theta \leq 1$ функцию $u(\theta)$ можно представить рядом Фурье:

$$u(\theta) = U(0) + U(1) \text{wal}(1, \theta) + U(2) \text{wal}(2, \theta) + \dots + U(k) \text{wal}(k, \theta) \quad (6.17)$$

с коэффициентами

$$U(k) = \int_0^1 u(\theta) \text{wal}(k, \theta) d\theta. \quad (6.18)$$

Показанные на рис. 6.14 диаграммы относятся к 8-й функции Уолша и ее АКФ. Из рисунка видно, что за счет корреляционной обработки выходной сигнал значительно превышает по уровню амплитуду исходной последовательности.

Генераторы линейных M -последовательностей

M -последовательность генерируется (формируется) m -разрядным двоичным регистром сдвига, который охвачен обратной связью через сумматор, осуществляющий суммирование по модулю 2 (способы введения обратных связей табулированы).

На рис. 6.15 в качестве примера показан четырехразрядный сдвигающий регистр, который формирует M -последовательность, содержащую 15 элементов в одном периоде. Регистр содержит четыре цифровых триггерных ячейки, соединенных последовательно. Их прямые выходы обозначены соответственно Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . Выход регистра Q_4 служит выходом генератора.

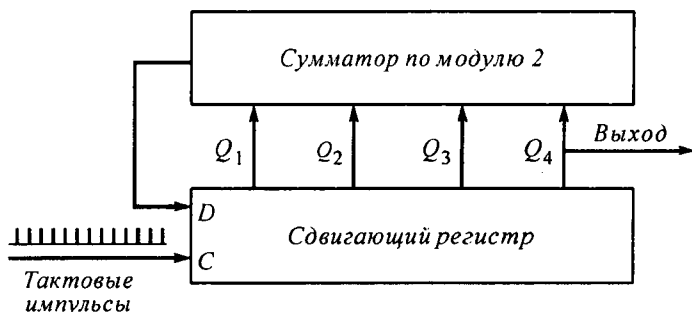


Рис. 6.15. Генератор 15-и элементной M -последовательности

Как известно, на выходе триггерной ячейки могут быть зафиксированы либо 1, либо 0. В схеме сдвигающий (тактовый) импульс, подводимый к входу C регистра, подается на все триггеры одновременно. Если триггер i -го разряда находится в положении 0 (что означает 0 на выходе Q_i), то импульс не воздействует на него. В противоположном случае, т. е. когда триггер пребывает в состоянии 1, сдвигающий импульс переключает его в положение 0, в результате чего кодовая 1 записывается в триггер $(i + 1)$ -го разряда.

Тактовые импульсы подаются непрерывно с частотой F_c (интервалом следования Δt), и каждый новый импульс продвигает единицу все дальше по направлению к выходу регистра. Когда на выходе сумматора по модулю 2 появляется единица, то она поступает на вход D регистра и записывается в первую триггерную ячейку. Очередной тактовый импульс сдвигает эту единицу в следующую ячейку и т.д.

Положим, что в начальном состоянии в регистре записано число 1000. Его будем считать 1-й комбинацией единиц и нулей. С приходом первого сдвигающего импульса это число изменится — получится 2-я комбинация — 1100, и т.д. После 15-й комбинации образуется вновь 1-я и число на выходе регистра — 1000. Ниже в табл. 6.1 приведены 15 комбинаций, причем в скобках указана цифра, получающаяся на выходе сумматора по модулю два.

Таблица 6.1. Комбинации чисел в схеме генератора

№ комбинации	Число	№ комбинации	Число	№ комбинации	Число
1	1000 (1)	6	1011 (0)	11	0011 (1)
2	1100 (0)	7	0101 (1)	12	1001 (0)
3	1110 (1)	8	1010 (1)	13	0100 (0)
4	1111 (0)	9	1101 (0)	14	0010 (0)
5	0111 (1)	10	0110 (0)	15	0001 (1)

Таким образом, на выходе генератора, т. е. выходе Q_4 , за один цикл (период T) образуется последовательность нулей и единиц (см. последнюю цифру каждой комбинации): 000111101011001.

Из параметров генератора и характеристик спектральной плотности M -последовательности (свойство 4) несложно определить, что высота спектральных линий в полосе частот $0,05F_c$ практически постоянна: уменьшение мощности на частоте $0,05 F_c$ составляет всего 0,036 дБ. Изменение мощности на $-0,1$ дБ имеет место на частоте $0,085 F_c$, а изменение ее на -3 дБ — на частоте $0,45F_c$. Так, если сдвигающий регистр содержит 20 разрядов, т. е. наибольшая длина последовательности $M = 2^m - 1 = 1048575$, то при частоте следования сдвигающих импульсов $F_c = 1 \text{ МГц}$ полоса «постоянной мощности» составляет 50 кГц, а расстояние между спектральными линиями равно около 1 Гц. Полоса, в которой мощность изменяется на 3 дБ, — до 450 кГц.

Изменение частоты следования сдвигающих импульсов F_c при неизменной длине последовательности ($M = \text{const}$) пропорционально изменяет расстояние между спектральными линиями, но не меняет числа линий в лепестке или общей мощности сигнала. Спектральная плотность мощности обратно пропорциональна частоте F_c . Изменение длины последовательности M при $F_c = \text{const}$ также сопровождается изменением расстояния между спектральными линиями, но обратно пропорциональным. Соответственно изменяется число линий в лепестке. Однако общая мощность сигнала и распределение ее по лепесткам сохраняются. Следовательно, высоты спектральных линий изменяются так, что спектральная плотность мощности остается постоянной.

6.7. Стандарты и синтезаторы частоты

Как уже отмечалось, для создания стабильного по частоте и фазе сигнала используют кварцевые генераторы, имеющие высокую стабильность частоты. Кварцевые стандарты частоты имеют более высокие показатели по стабильности и их нестабильность частоты порядка $10^{-8} \dots 10^{-9}$.

Еще лучшую стабильность частоты (нестабильность порядка 10^{-12}) обеспечивают квантомеханические стандарты частоты, действие которых основано на использовании электромагнитного излучения атомов определенного химического элемента при переходе их из одного энергетического состояния в другое. На этой основе созданы водородные, цезиевые и рубидиевые генераторы.

Все перечисленные кварцевые генераторы и стандарты частоты обеспечивают формирование высокостабильных сигналов только на нескольких (порядка 3) значениях частот. При необходимости иметь большой набор генерируемых частот используют кварцевые синтезаторы частот.

Синтезаторами частоты называют специальные генераторы гармонических напряжений с дискретной перестройкой частоты и стабильностью, равной стабильности частоты лучших кварцевых генераторов. Они обеспечивают синусоидальную форму, высокую спектральную «чистоту», большую точность установки и возможность программной перестройки частоты. Синтезаторы позволяют получать напряжения фиксированных частот с дискретностью (*сеткой* частот) до сотых долей герц. По точности установки и стабильности частоты синтезаторы превосходят обычные измерительные генераторы с плавной перестройкой частоты. Они легко сопрягаются с автоматизированными информационно-измерительными системами.

Кварцевые синтезаторы частоты — это многочастотные генераторы гармонических напряжений с дискретной перестройкой частоты. Упрощенная структурная схема аналогового синтезатора частоты дана на рис. 6.16. В нее входят кварцевый генератор частоты f_0 , устройство формирования опорных частот, устройство переключения, подключающее на выход сигнал нужной частоты, цифровое отсчетное и выходное устройства.

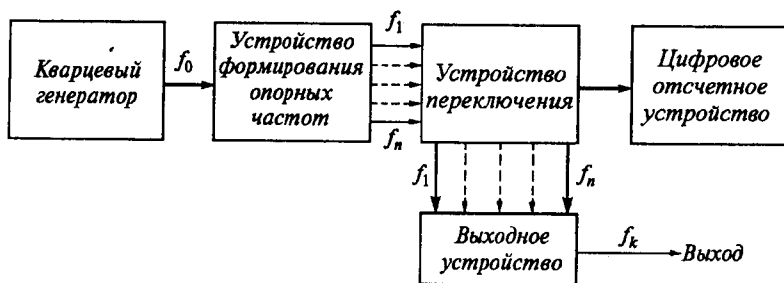


Рис. 6.16. Упрощенная структурная схема синтезатора частот

В современных высококачественных широкодиапазонных измерительных генераторах требование высокой стабильности частоты и возможности ее быстрой перестройки являются трудно совместимыми. Поэтому при разработке синтезаторов частоты переходят к дискретному перекрытию частотного диапазона, при котором допускается генерирование сигналов на любой из множества частот, следующих друг за другом с определенным фиксированным интервалом, называемым *шагом дискретной сетки*.

На рис. 6.17 показана одна из структурных схем аналогового синтезатора частоты с цифровым управлением. Синтезатор содержит опорный кварцевый генератор (ОКГ), управляемый делитель частоты (УДЧ), управляемый генератор (УГ), фазовый детектор (ФД) с цепью фазовой автоматической подстройки частоты и программируемое цифровое устройство (ПЦУ).

На фазовый детектор подают два колебания: первое со стабильной частотой $f_{оп}$ — от опорного кварцевого генератора; второе с частотой $f/N \approx f_{оп}$ че-

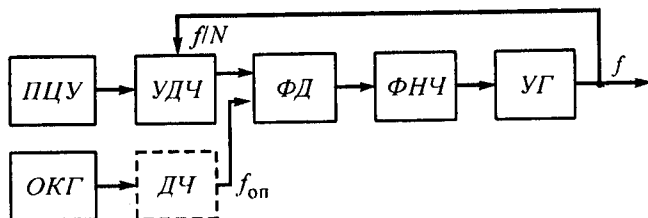


Рис. 6.17. Структурная схема аналогового синтезатора частот

рез управляемый делитель частоты с коэффициентом деления N — от управляемого генератора. Напряжение с выхода фазового детектора через фильтр нижних частот (ФНЧ) воздействует на управляемый генератор и подстраивает его до обеспечения равенства частот f/N и $f_{оп}$. Изменяя с помощью ПЦУ коэффициент деления N , можно получить требуемую сетку частот с шагом, равным $f_{оп}$. Поскольку выходная частота синтезатора связана с частотой опорного кварцевого генератора как $f = N f_{оп}$, то относительные нестабильности этих частот равны. Если в таком синтезаторе требуется стабилизировать очень низкую частоту, то между опорным кварцевым генератором и фазовым детектором необходимо дополнительно ввести делитель частоты (ДЧ).

Представленный простейший вариант синтезатора частоты имеет серьезные недостатки. Первый из них связан с конечностью ширины полосы синхронизации управляемого генератора, которая зависит от управляющих элементов генератора и коэффициентов передачи ФД и ФНЧ. Поэтому для получения широкой сетки частот приходится изменять собственную частоту f управляемого генератора. Второй недостаток обусловлен узкими возможностями УДЧ, построенного, как правило, на основе счетчика импульсов. Введением обратной связи в делитель частоты можно изменять его коэффициент деления, который будет принимать любые целочисленные значения, допустимые разрядностью счетчика.

Цифровые синтезаторы измерительных сигналов. Прогресс в области микропроцессорной техники обусловил появление измерительных генераторов с новыми принципами формирования сигналов. Достоинством цифровых методов синтеза является малое время установления частоты колебаний при перестройке, что важно для функционирования быстрореагирующих автоматизированных систем, а также отсутствие разрыва фазы при смене частот.

В современных передатчиках часто требуется использовать дробные значения коэффициента деления частоты. Метод дробного преобразования частоты используется в новейших разработках цифровых синтезаторов, реализуемых по следующей базовой схеме (рис. 6.18).

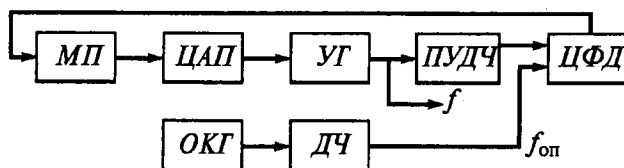


Рис. 6.18. Структурная схема цифрового синтезатора частоты

В таком синтезаторе коэффициент деления программно-управляемого делителя частоты (ПДУЧ) изменяется во времени, образуя последовательность временных циклов определенной длительности. Полученный цикл также делят на несколько подциклов, в течение каждого из которых коэффициент деления постоянен. Изменение коэффициента деления производится в момент перехода от одного подцикла к другому таким образом, чтобы средний за время цикла коэффициент деления был равен заданному. В схеме цифрового синтезатора частоты используются цифровой фазовый детектор (ЦФД), ЦАП и микропроцессор (МП).

Подстройку выходной частоты производят в конце каждого цикла. Для этого используют управляемый генератор, напряжение подстройки частоты на который подается с ЦАП. Сигнал управления (ошибки, рассогласования) вырабатывается цифровым фазовым детектором и его уровень соответствует значению средней за время цикла разности фаз колебаний, получаемых от опорного кварцевого генератора и управляемого генератора. Затем сигнал управления с фазового детектора подается на микропроцессор, который через ЦАП по заданному коду требуемой частоты осуществляет программное управление схемой ПДУЧ.

Контрольные вопросы

1. Как различаются измерительные генераторы в зависимости от формы выходного сигнала?
2. Как подразделяются генераторы по частотным характеристикам?
3. Каковы условия самовозбуждения генератора гармонических колебаний? Какими методами они реализуются?
4. Каковы методы создания генераторов инфранизких частот?
5. В чем особенности конструирования генераторов сверхвысоких частот?
6. Какова упрощенная функциональная схема цифрового измерительного генератора?
7. Какие физические явления могут быть положены в основу создания шумовых генераторов?
8. Какие требования предъявляются к форме сигнала импульсного генератора?
9. Для каких целей используются стандарты частоты?
10. На каких принципах строятся схемы синтезаторов частоты?
11. Для чего используются генераторы шумоподобных сигналов?

Глава 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СИГНАЛОВ

Как уже отмечалось, электрические колебания (сигналы) можно определить как во временной области, так и в частотной. Во временной области электрическое колебание прежде всего характеризуется его формой — зависимостью мгновенного значения от времени.

Наглядное, или визуальное воспроизведение формы колебаний является важной задачей радиотехнических измерений, поскольку форма позволяет сразу оценить многие параметры колебаний. Одним из основных приборов, служащих для визуального наблюдения и исследования формы электрических сигналов, является осциллограф (от лат. «осциллум» — колебание и греч. «графо» — пишу).

7.1. Общие сведения

Большинство современных осциллографов, находящихся в эксплуатации, оснащены электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) и их называют электронно-лучевыми осциллографами. Вместе с тем, в последних разработках осциллографов в качестве отображающих устройств применяются матричные индикаторные панели (газоразрядные, плазменные, жидкокристаллические, твердотельные и т. д.).

Электронно-лучевой осциллограф — измерительный прибор для визуального наблюдения в прямоугольной системе координат электрических сигналов и измерения их параметров. С помощью осциллографа можно наблюдать периодические непрерывные и импульсные сигналы, непериодические и случайные сигналы, одиночные импульсы и оценивать их параметры. Чаще всего с помощью осциллографа наблюдают зависимость напряжения от времени, причем, как правило, осью времени является ось абсцисс, а по оси ординат откладывается уровень сигнала. По изображениям, получаемым на экране осциллографа, могут быть измерены амплитуда, частота и фазовый сдвиг, параметры модулированных сигналов, временные интервалы и ряд других параметров. На базе осциллографа созданы приборы для исследования переходных, частотных и амплитудных характеристик различных радиотехнических устройств.

Для многих целей разработаны и используются различные типы электронно-лучевых осциллографов: универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие и специальные. Отличаясь техническими характери-

стиками и схемными и конструктивными решениями, эти осциллографы используют общий принцип получения осциллограмм. Возможность наблюдения формы исследуемого сигнала и одновременное измерение его параметров выдвигают электронно-лучевой осциллограф в разряд универсальных приборов.

На основе совершенствования первоначальной схемы универсального осциллографа (его обозначение С1 —...) создан целый ряд отечественных специализированных приборов:

С7 —... скоростные, стробоскопические;

С8 —... запоминающие;

С9 —... специальные, в том числе цифровые.

Иногда эти разновидности бывают объединены в одном приборе. Выбор маркировки зависит от разработчика.

Наибольшее распространение получили *универсальные осциллографы*, позволяющие исследовать разнообразные электрические сигналы с длительностью от единиц наносекунд до нескольких секунд в диапазоне амплитуд от долей милливольт до сотен вольт, а также измерять параметры таких сигналов с приемлемой для практики погрешностью (5...7 %). Полоса пропускания лучших универсальных осциллографов составляет 300...500 МГц и более. Изображение сигнала на экране индицируется практически одновременно с его появлением на входе прибора, поэтому их называют осциллографами реального масштаба времени. Универсальные осциллографы выполняют и со сменными блоками, расширяющими их функциональные возможности.

Повторяющиеся кратковременные процессы исследуют с помощью *стробоскопических осциллографов*. По принципу действия стробоскопические осциллографы относятся к приборам с преобразованием временного масштаба и отличаются высокой чувствительностью и широкой (до 10 ГГц) рабочей полосой.

Для исследования быстро протекающих процессов (нано- и пикосекундной длительности) применяют *скоростные осциллографы*, которые снабжены специальной электронно-лучевой трубкой бегущей волны. Предварительного усиления входного сигнала в скоростных осциллографах обычно не производят, поэтому чувствительность их невелика. Эти приборы являются осциллографами реального времени, имеют широкую рабочую полосу частот (до 5 Гц), и позволяют наблюдать и фотографировать одиночные и периодические сигналы.

Запоминающие осциллографы, имеющие специальные электронно-лучевые трубки, обладают способностью сохранять и воспроизводить изображение сигнала в течение длительного времени после исчезновения его на входе. Основное назначение запоминающих осциллографов — исследование однократных и редко повторяющихся процессов. Запоминающие осциллографы имеют почти те же характеристики, что и универсальные, однако отличаются расширенными функциональными возможностями.

Специальные осциллографы оснащены дополнительными блоками целевого назначения. К ним относятся и телевизионные осциллографы, позволяющие наблюдать видеосигнал заданной строки изображения, и цифровые, дающие возможность не только наблюдать сигнал, но и передать его в цифровом виде на компьютер для дальнейшей обработки. Специальные осциллографы снабжаются мультиметрами, позволяющими измерять напряжения, силу токов и сопротивления, а также устройствами для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов.

По числу одновременно наблюдаемых на экране электронно-лучевой трубки сигналов различают *одноканальные* и *многоканальные осциллографы*. Совмещение на экране изображений нескольких входных сигналов реализуют или использованием специальной многолучевой трубки, или путем периодического переключения осциллографа на разные входы с помощью электронного коммутатора.

7.2. Универсальные осциллографы

Рассмотрим упрощенную структурную схему универсального осциллографа (рис. 7.1). В схеме этого осциллографа кроме электронно-лучевой трубки можно выделить следующие функциональные блоки: каналы вертикального и горизонтального отклонений, устройство синхронизации и запуска развертки, канал модуляции луча, вспомогательные устройства, источник питания. В осциллографе исследуемый электрический сигнал подается через канал вертикального отклонения на вертикально отклоняющую систему ЭЛТ, а горизонтальное отклонение электронного луча трубки осуществляется напряжением горизонтальной развертки.

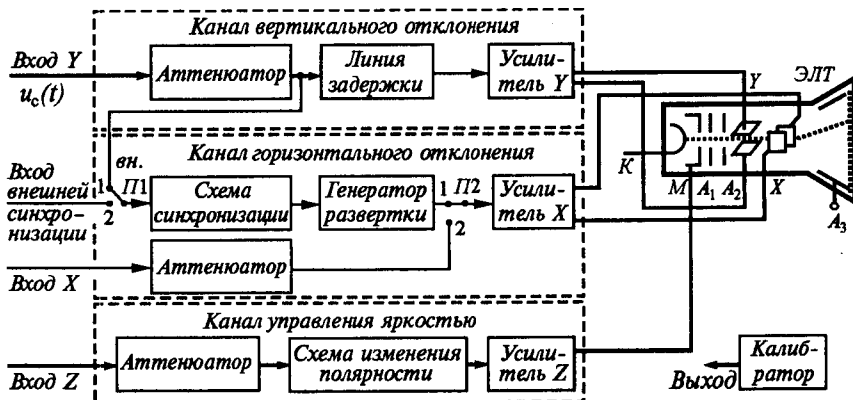


Рис. 7.1. Упрощенная структурная схема универсального осциллографа

ЭЛТ представляет собой вакуумную стеклянную колбу, внутри которой размещены электронная пушка, отклоняющие пластины и люминесцентный экран. Электронная пушка состоит из подогреваемого катода K , модулятора (сетки) яркости светового пятна M , электродов фокусировки и ускорения электронного луча — фокусирующего анода A_1 , ускоряющего анода A_2 и основного анода A_3 . Яркость свечения люминофора ЭЛТ регулируется путем изменения отрицательного напряжения на модуляторе M . Напряжение на первом аноде A_1 фокусирует электронный поток в узкий луч. Чтобы придать электронам скорость, необходимую для свечения люминофора, на второй анод A_2 подается достаточно большое (до 2000 В) положительное напряжение. Для дополнительного ускорения электронов используют основной анод A_3 , к которому приложено высокое положительное напряжение (до 10...15 кВ).

Полагая, что студенты из курса физики знакомы с устройством электронной пушки, отметим лишь, что ее назначением является формирование узкого электронного пучка, при попадании которого на люминесцентный экран на экране возникает светящееся пятно.

Упрощенно работу отклоняющих систем ЭЛТ можно пояснить следующим образом. Электронный пучок (луч), проходит между двумя парами взаимно перпендикулярных металлических отклоняющих пластин: вертикально отклоняющих Y и горизонтально отклоняющих X . Если к отклоняющим пластинам приложить напряжение, то между ними будет существовать электрическое поле, которое будет вызывать отклонение электронного луча в ту или иную сторону. Когда напряжение приложено к вертикально отклоняющим пластинам, то пятно будет перемещаться по оси Y ; если же напряжение приложено к горизонтально отклоняющим пластинам, то световое пятно на экране трубки будет отклоняться вдоль оси X . Если теперь сфокусировать электронный луч так, чтобы световое пятно расположилось в центре экрана ЭЛТ, а затем к пластинам Y приложить исследуемое напряжение, а к пластинам X пилообразное напряжение, то под совместным воздействием двух напряжений луч вычертит на экране трубки осциллограмму, отражающую зависимость входного напряжения от времени.

Канал вертикального отклонения луча (рис. 7.1) служит для передачи на пластины Y ЭЛТ исследуемого сигнала $u_c(t)$, подводимого к входу Y . Канал вертикального отклонения луча содержит аттенюатор, линию задержки и усилитель Y . Аттенюатор позволяет ослабить сигнал $u_c(t)$ в определенное число раз, а регулируемая линия задержки обеспечивает небольшой временной сдвиг сигнала на пластинах Y ЭЛТ относительно начала развертывающего напряжения U_x , что важно для ждущего режима. Усилитель Y обеспечивает амплитуду сигнала на пластинах Y , достаточную для значительного отклонения луча на экране даже малым исследуемым сигналом $u_c(t)$.

В свою очередь, усилитель Y канала вертикального отклонения луча содержит входной усилитель с изменяемым коэффициентом усиления K_{yc} и

парафазный (с противофазными выходными сигналами одинаковой амплитуды) усилитель, обеспечивающий положение светового пятна в центре экрана при отсутствии исследуемых сигналов. В канал вертикального отклонения луча может также входить калибратор амплитуды. Сигнал от калибратора поступает на вход первого усилителя для установки заданного коэффициента усиления K_{yc1} . При этом цена деления $B/\text{дел}$ масштабной сетки на экране осциллографа без учета аттенюатора определится формулой:

$$c = \left| \frac{U_k}{K_{yc1} n_k} \right|, \quad (7.1)$$

где U_k — напряжение на выходе калибратора; K_{yc1} — коэффициент усиления усилителя канала Y при одном фиксированном положении регулировки; n_k — число делений сетки, занятое изображением калибровочного сигнала на экране ЭЛТ.

Цена деления масштабной сетки с учетом коэффициента деления k_d аттенюатора $c_d = ck_d$. Если в процессе работы параметр c остается постоянным, то величина c_d может быть указана на дискретном переключателе аттенюатора, что и делается на практике.

Основные характеристики канала вертикального отклонения:

- верхняя граничная частота (порядка 100 МГц и более);
- чувствительность $S_y = k_d K_{yc} S_T$ (S_T — чувствительность трубки); чувствительность составляет около 1 мм/мВ при $k_d = 1$;
- входное сопротивление (1...3 МОм) и входная емкость канала (1...5 пФ);
- погрешности измерения напряжения и интервалов времени 5...7 %.

Во входной цепи канала вертикального отклонения включают также коммутируемый разделительный конденсатор, позволяющий при необходимости исключить подачу на вход осциллографа постоянной составляющей исследуемого сигнала («закрытый» вход).

Канал горизонтального отклонения луча служит для создания горизонтально отклоняющего — *развертывающего* — напряжения U_x с помощью напряжения генератора развертки или для передачи (через аттенюатор и усилитель) на пластины X исследуемого сигнала, подводимого к входу X .

Схема синхронизации (и запуска развертки) управляет генератором развертки и обеспечивает кратность периодов сигнала и развертки. Для получения неподвижного изображения начало развертки должно быть связано с одной и той же характерной точкой сигнала (фронтом, максимумом амплитуды и т.д.). Это достигается синхронизацией напряжения развертки с напряжением сигнала, поэтому период развертки должен быть равен или кратен периоду исследуемого сигнала: $T_{разв} = nT_c$, где $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Развертка — это линия, которую прочерчивает луч на экране при отсутствии исследуемого сигнала в результате действия только одного *развер-*

тывающего напряжения. Процесс привязки развертки к характерным точкам сигнала называют *синхронизацией* в автоколебательном режиме и *запуском* — в ждущем. Синхронизация и запуск развертки производятся специальным синхроимпульсом, подаваемым на генератор из устройства синхронизации.

В осциллографе установлены два режима синхронизации: *внутренняя* и *внешняя*. При внутренней синхронизации (переключатели *П1* и *П2* — в положении 1) синхроимпульсы вырабатываются из усиленного входного сигнала до его задержки. При внешней (переключатели *П1* и *П2* — в положении 2) — сигнал синхронизации подается от внешнего источника на специальный вход *X* осциллографа. Например, в стандартных генераторах импульсов вырабатываются синхроимпульсы, относительно которых выходной сигнал может быть сдвинут с помощью регулируемой задержки.

Схема синхронизации вырабатывает сигнал синхронизации, поступающий на генератор развертки для получения четкой, неподвижной осциллограммы. Усилитель *X* канала горизонтального отклонения усиливает пилообразный сигнал U_p генератора развертки и преобразует его в напряжение развертки U_x .

Канал горизонтального отклонения характеризуется чувствительностью и полосой пропускания, показатели которых практически раза в два меньше, чем в канале вертикального отклонения. Основной блок в канале горизонтального отклонения — генератор развертки, работающий в непрерывном или ждущем режиме. К форме пилообразного напряжения генератора предъявляется ряд требований:

- время обратного хода луча должно быть много меньше времени прямого хода, т.е. $T_{обр} \ll T_{пр}$. В противном случае часть изображения сигнала будет отсутствовать;

- напряжение развертки при прямом ходе луча должно быть линейным, иначе луч будет двигаться по экрану с различной скоростью и нарушится равномерность временного масштаба по оси *X*. Это может привести к искажению сигнала.

Канал управления яркостью (канал модуляции электронного луча по яркости) осциллографа предназначен для подсветки прямого хода луча. Подсветка осуществляется путем передачи с входа *Z* на управляющий электрод (модулятор *M*) ЭЛТ сигнала, модулирующего поток ее луча и, следовательно, яркость свечения люминофора. Постоянное напряжение на модуляторе ЭЛТ выбирают на уровне запирающей трубки. В схему этого канала входят: аттенюатор, схема изменения полярности и усилитель *Z*. Для формирования требуемого уровня напряжения, поступающего на модулятор, служит усилитель *Z*. Усилитель может иметь дополнительный вход. Это дает возможность модуляции изображения по яркости внешним сигналом. Канал *Z* используется и для создания яркостной отметки в осциллографах с двойной разверткой, а также яркостных меток для измерения частоты и фазы.

Калибратор — генератор напряжений, формирующий периодический импульсный сигнал с известными амплитудой, длительностью и частотой для калибровки осциллографа, т. е. для обеспечения правильных измерений параметров исследуемого сигнала.

Для калибровки оси Y используют постоянные напряжения обеих полярностей (иногда плавно регулируемые) и напряжения в виде меандра. Масштаб по оси X обычно устанавливают по синусоидальному напряжению, стабилизированному по частоте кварцем.

Виды разверток в универсальном осциллографе

Одним из основных блоков осциллографа является ЭЛТ, выходные элементы которой — две пары пластин, с помощью генераторов развертки отклоняющие луч горизонтально и вертикально. Если развертывающее напряжение приложено к одной паре отклоняющих пластин (обычно к пластинам X), то развертку называют по форме развертывающего напряжения (например, *линейной* или *синусоидальной*). Если развертывающие напряжения приложены к отклоняющим пластинам X и Y трубки одновременно, то название развертке дается по ее форме (например, *круговая* или *эллиптическая*).

Наиболее широко используется *линейная развертка*, создаваемая пилообразным напряжением U_p генератора развертки. В случае линейной развертки луч, двигаясь равномерно по экрану, прочерчивает прямую горизонтальную линию, как бы нанося на экран ось абсцисс декартовой системы координат — ось времени. В зависимости от режима работы генератора развертки такую развертку подразделяют на несколько видов. Рассмотрим некоторые из них.

Автоколебательная развертка — это развертка, при которой генератор развертки периодически запускается (автоматически) и при отсутствии сигнала запуска на его входе.

Ждущая развертка — развертка, при которой генератор развертки запускается только с помощью сигнала запуска.

Однократная развертка — развертка, с помощью которой генератор развертки запускается один раз с последующей блокировкой. Однократная развертка применяется для наблюдения одиночных и непериодических процессов, а также при фотографировании с экрана осциллографа неповторяющихся сигналов.

При подаче на горизонтально отклоняющие пластины напряжения $u_x = u_p$ пилообразной формы (рис. 7.2), электронный сфокусированный луч под воздействием этого напряжения перемещается слева направо на интервале $T_{пр}$ (точки 0 — 1 — 2 — длительность прямого хода луча) и справа налево на интервале $T_{обр}$ (точки 2 — 3 — длительность обратного хода луча). Причем скорость движения луча в обратном направлении много больше (обычно луч при этом гасится), чем в прямом.

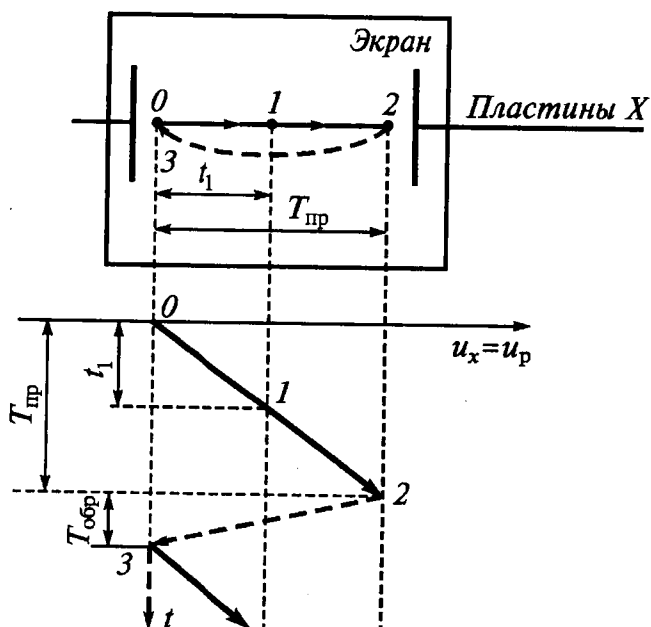


Рис. 7.2. Диаграмма, поясняющая создание временного масштаба по горизонтальной оси экрана ЭЛТ:
 — прямой ход луча, ————— обратный ход луча;
 $T_{разв} = T_{пр} + T_{обр}$; $T_{пр} = 2t_1$

С помощью напряжения развертки, подаваемого на горизонтальные пластины ЭЛТ (пластины X) осциллографа, на его экране можно наблюдать исследуемый сигнал, поступающий на пластины Y и изменяющийся во времени (развернутый во времени).

Автоколебательная (непрерывная) развертка применяется для исследования периодических сигналов, а также импульсных с небольшой скважностью $q = T_c/\tau$. Она включается при внутренней синхронизации.

На рис. 7.3 представлены исследуемые импульсы u_c длительностью τ каждый, развертывающее синхронное напряжение u_x и наблюдаемая осциллограмма (в рамке). Период повторения импульсов и период развертывающего напряжения: $T_c = T_p$.

С помощью автоколебательной развертки почти невозможно наблюдать непериодические сигналы и она фактически бесполезна при наблюдении периодических коротких импульсных сигналов с большой скважностью q (это связано с тем, что передний и задний фронты импульса почти сливаются). В этих случаях используют ждущую развертку.

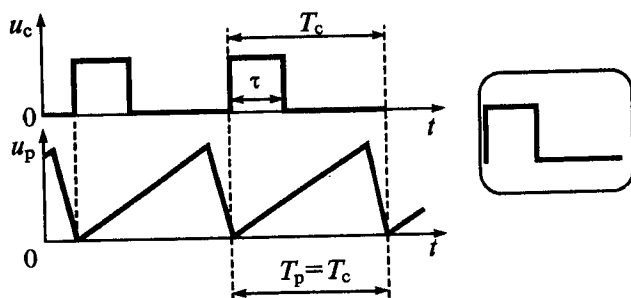


Рис. 7.3. Пример применения автоколебательной развертки

Характерный пример использования ждущей развертки в осциллографе показан на рис. 7.4. Генератор развертки запускается только при поступлении импульсов u_c . Если длительность развертки, равная $t_2 - t_1$, сопоставима с длительностью исследуемого импульса, то его изображение на экране достаточно детально.

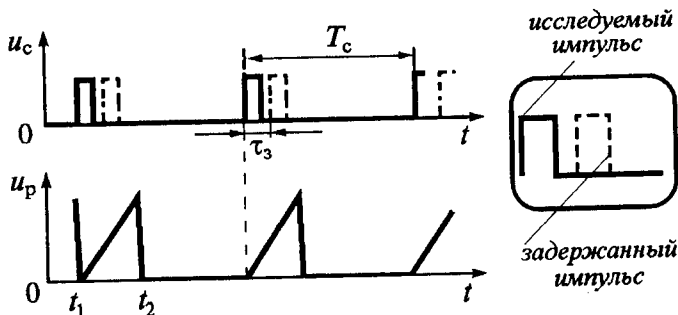


Рис. 7.4. Пример применения ждущей развертки

В осциллографе в силу инерционности генератора начало ждущей развертки может быть несколько задержано относительно фронта импульса u_c . Поэтому, если фронт импульса очень короткий, то он может не отобразиться на осциллограмме. Для наблюдения короткого фронта сигнала u_c задерживают на τ_3 во времени в канале Y с помощью линии задержки (штриховые импульсы u_c на рис. 7.4). Наблюдаемая осциллограмма дана вместе с не задержанным импульсом на рис. 7.4 штриховой линией (в рамке).

Для решения ряда измерительных задач, например измерения частоты или разности фаз, вместо пилообразного напряжения развертки (линейной развертки) используют синусоидальную развертку. Для получения

синусоидальной развертки на пластины X подают напряжение, изменяющееся по гармоническому закону $u_x(t) = U_{mx} \sin \omega t$. При этом генератор линейной развертки осциллографа отключается. Положительный полупериод напряжения синусоидальной развертки вызывает перемещение луча от центра экрана до его правой границы и обратно; отрицательный полупериод — от центра экрана до его левой границы и обратно к центру. Скорость перемещения луча изменяется по синусоидальному закону, хотя линия развертки представляет собой горизонтальную линию.

Для получения круговой развертки на пластины Y подается синусоидальный сигнал $u_y = U \sin \omega t = U \sin(2\pi t/T)$, а на пластины X — аналогичный по форме и амплитуде сигнал, но задержанный на четверть периода (по фазе на $\varphi = 90^\circ$), т.е. $u_x = U \sin[\omega(t - T/4)] = -\cos \omega t$. Осциллограмма круговой развертки показана на рис. 7.5.

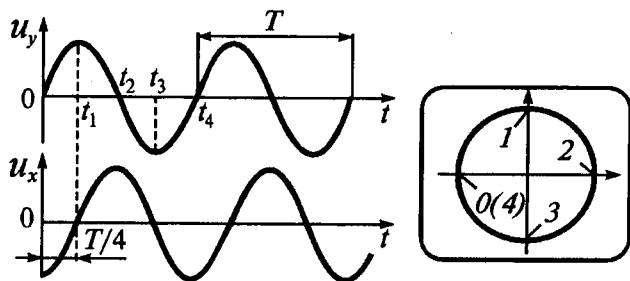


Рис. 7.5. Получение круговой развертки в осциллографе

Под действием напряжений разверток u_y и u_x луч прочерчивает на экране окружность за период T . Положение луча на экране в момент времени $t = 0$ отмечено точкой 0, в момент t_1 — точкой 1 и т. д. Если амплитуды сигналов u_y и u_x не равны, то круг искажается и на экране наблюдается эллипс, т.е. возникает эллиптическая развертка. Например, при $u_y < u_x$ большая ось эллипса расположена по горизонтали, а малая по вертикали. При фазовых сдвигах, не равных 90° , также получается эллипс с наклонными осями, вырождающийся в прямую при нулевом фазовом сдвиге.

В современных осциллографах широко распространены генераторы двойной развертки (задерживающей и задержанной). Применение двойной развертки существенно увеличивает функциональные возможности осциллографа. В частности, это позволяет рассматривать отдельные участки сигнала в удобном масштабе, что повышает точность измерения.

Электронно-лучевая трубка

Способ получения сфокусированного луча и принцип управления лучом можно пояснить с помощью схемы, представленной на рис. 7.6. Как уже отмечалось,

в ЭЛТ совокупность электродов K, M, A_1, A_2, A_3 называется электронной пушкой, которая излучает узкий пучок электронов. Для этого на электроды подаются напряжения, примерные величины которых даны на рис. 7.6.

Основные характеристики ЭЛТ — чувствительность, полоса пропускания, длительность послесвечения, площадь экрана.

Чувствительность трубки $S_t = L_t/U_r$, где L_t — отклонение луча на экране трубки под воздействием напряжения U_r , приложенного к паре отклоняющих пластин. Обычно S_t порядка 1 мм/В.

С увеличением частоты исследуемого сигнала чувствительность трубки падает. Верхняя граница полосы пропускания ЭЛТ устанавливается на уровне, где чувствительность составляет примерно 0,7 от номинального значения. Для универсальных осциллографов широкого использования эта частота достигает 200 МГц. В современных осциллографах часто применяются многолучевые трубки, что достигается увеличением количества электродов. Более экономичным оказывается использование однолучевого осциллографа в режиме поочередной подачи двух сигналов на отклоняющие пластины (двухканальные осциллографы). За счет эффекта послесвечения трубки и свойств глаза на экране наблюдается одновременное изображение двух сигналов, хотя они подаются поочередно.

Один из важных параметров ЭЛТ — площадь рабочей части экрана, в пределах которой искажения осциллограммы минимальны. Для повышения эффективности использования площади экрана современные ЭЛТ имеют экран прямоугольной формы.

К световым параметрам ЭЛТ относятся:

- диаметр светового пятна, который при оптимальной яркости определяет разрешающую способность ЭЛТ;
- максимальная яркость свечения экрана — зависит от плотности электронного луча и регулируется изменением отрицательного напряжения на модуляторе;
- цвет свечения экрана — чаще всего используют зеленый и желтый цвета, обеспечивающие наименьшую утомляемость глаз; для фотографирования с экрана применяют ЭЛТ с голубым свечением, к которому более чувствительны фотоматериалы;
- время послесвечения — для улучшения визуального восприятия осциллограммы время свечения экрана должно превышать время воздействия на него электронов.

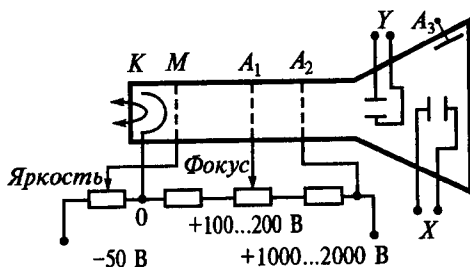


Рис. 7.6. Схема управления лучом ЭЛТ

Если требуется наблюдать процессы с частотой менее 10 Гц, используют экраны с послесвечением средней продолжительности до 100 мс. Для фоторегистрации более предпочтителен люминофор с малым (0,01 с) послесвечением. При исследовании медленно меняющихся процессов применяют экраны, имеющие послесвечение более 0,1 с.

Напряжение развертки при прямом ходе луча должно быть линейным, иначе появятся искажения исследуемого сигнала (рис. 7.7, а).

Нелинейность рабочего участка развертки прямого хода луча характеризуется коэффициентом нелинейности:

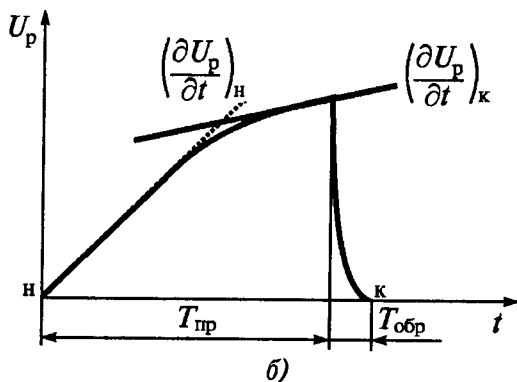
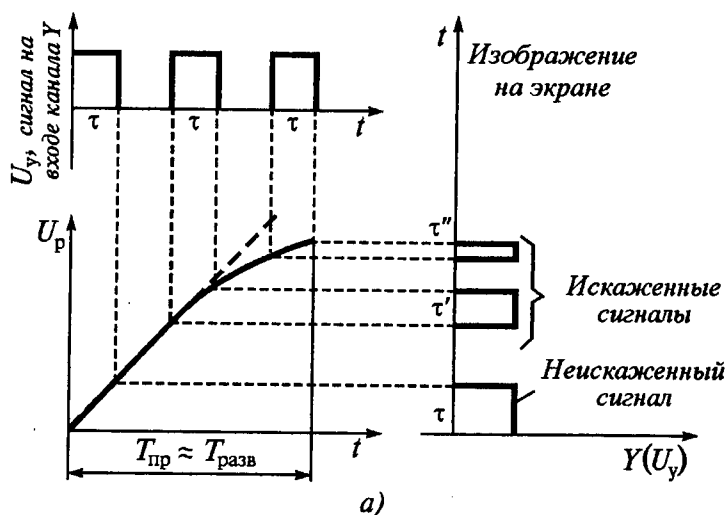


Рис. 7.7. Искажения осциллограммы сигнала:
а — вследствие нелинейности развертки; б — иллюстрация к понятию коэффициента нелинейности; н — начало развертки; к — конец развертки

$$\gamma = \frac{\left(\frac{\partial U_p}{\partial t}\right)_н - \left(\frac{\partial U_p}{\partial t}\right)_к}{\left(\frac{\partial U_p}{\partial t}\right)_н} 100 \%, \quad (7.2)$$

физический смысл которого поясняется рис. 7.7, б. Коэффициент нелинейности выражает относительное изменение скорости нарастания напряжения в начале и конце рабочего хода развертки. Коэффициент нелинейности рабочего участка развертки не должен превышать 1 %.

Перечисленным требованиям отвечал бы идеальный генератор развертки, упрощенная структурная схема которого показана на рис. 7.8, а.

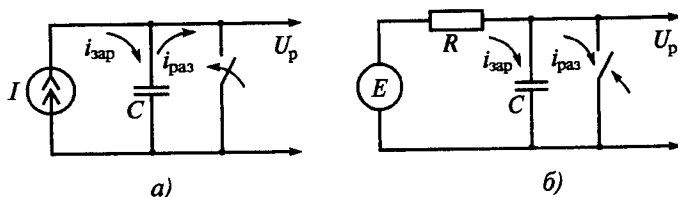


Рис. 7.8. Упрощенные структурные схемы генератора развертки:
а — идеальная; б — реальная

Бесконечно большая емкость C заряжается током $i_{зар}$ от источника тока I в течение достаточно большого интервала времени $T_{пр}$, а затем в течение очень малого времени при замкнутом ключе происходит ее разряд током $i_{раз}$. Время замыкания ключа соответствует времени обратного хода. Тогда напряжение развертки для рабочего участка запишется так:

$$U_p = U_C = \frac{1}{C} \int_0^{T_{пр}} i_{зар} dt = \frac{1}{C} i_{зар} t \Big|_0^{T_{пр}}, \quad (7.3)$$

т.е. имеет место линейная зависимость.

Однако реальная схема генератора оказывается ближе к схеме, изображенной на рис. 7.8, б. Для этой схемы изменение напряжения на конденсаторе в течение рабочего времени определяется формулой:

$$U_C = E(1 - e^{-t/\tau}), \quad (7.4)$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени.

Разложив функцию $e^{-t/\tau}$ в ряд Тейлора

$$e^{-t/\tau} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2!\tau^2} - \frac{t^3}{3!\tau^3} + \dots, \quad (7.5)$$

получим:

$$U_C = E \left(\frac{t}{\tau} - \frac{t^2}{2\tau^2} + \frac{t^3}{6\tau^3} - \dots \right). \quad (7.6)$$

Если в (7.6) ограничиться двумя членами разложения $U_C = E \frac{t}{\tau} - E \frac{t^2}{2\tau^2}$, то нетрудно заметить, что в основном нелинейность напряжения генератора определяется составляющей $E \frac{t^2}{2\tau^2}$. Следовательно, необходимо, чтобы зна-

чение $E \frac{t^2}{2\tau^2} \rightarrow 0$, что возможно при $\tau \gg T_{\text{пр}}$. Этот случай соответствует рабо-

те на начальном участке экспоненты, т.е. на линейной части развертки. Это значит, что режим источника напряжения E должен приближаться к режиму генератора тока.

Практически линейную развертку на экране ЭЛТ при ограниченном уровне питающего напряжения E можно создать в схемах интеграторов на ОУ (рис. 7.9). Поскольку в схеме в силу идеальности ОУ ток $i_0 = 0$, находим, что $i_R = u_{\text{вх}}/R$; $i_C = -C du_{\text{вых}}/dt$.

Приравняв токи и полагая $RC = \tau_a$, после несложных преобразований, получим:

$$u_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}} dt = -\frac{1}{\tau_a} \int_0^t u_{\text{вх}} dt, \quad (7.7)$$

т.е., данное устройство на ОУ будет осуществлять линейное интегрирование напряжения развертки.

Двухканальные и двухлучевые осциллографы

Двухканальные осциллографы имеют два идентичных канала вертикального отклонения (вход первого — $Y1$, второго — $Y2$) и электронный переключатель, который может поочередно подавать выходные сигналы каналов на одни и те же пластины Y . В зависимости от управления работой электронного переключателя можно реализовать следующие основные режимы работы осциллографа: *одноканальный* (на экране виден один сигнал, подаваемый на $Y1$ или $Y2$); *поочередный* (на экране видны оба сигнала за счет переключения электронного переключателя во время каждого обратного хода развертки). На основе двухканального принципа строят многоканальные осциллографы с числом каналов до восьми.

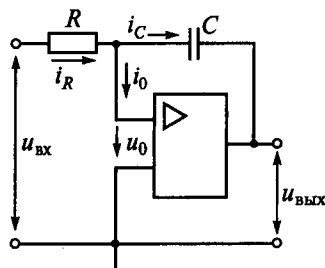


Рис. 7.9. Генератор развертки на ОУ

Двухлучевые осциллографы имеют два канала Y и специальную двухлучевую ЭЛТ, в которой есть две независимые электронные пушки и пара систем отклоняющих пластин. Горизонтальная развертка лучей общая — запускается от генератора развертки, а вертикальная — каждая от «своего» канала Y , что позволяет наблюдать на экране осциллограммы двух сигналов (без их периодического прерывания, как в двухканальных). Такие осциллографы намного сложнее схематехнически и дороже двухканальных.

Автоматизация процесса измерений в универсальных осциллографах

Автоматизация процесса измерений дает значительный выигрыш во времени и в ряде случаев существенно повышает точность измерений. Рассмотрим возможные пути автоматизации регулировок и отсчета показаний при проведении осциллографических измерений.

Автоматическая установка масштабов по осям X и Y . Действие автоматической установки масштабов заключается в том, что при изменении амплитуды и длительности входного сигнала в интервале динамического диапазона осциллографа размеры изображения остаются постоянными или меняются в заданных пределах. При этом производится цифровая индикация коэффициентов отклонения и развертки либо на специальном индикаторе, либо непосредственно на экране ЭЛТ.

Автоматизация регулировки яркости изображения. Регулировка яркости изображения — одна из необходимых операций при осциллографировании. Она занимает много времени, так как яркость зависит от скорости перемещения луча по экрану, связанной с видом сигнала и величиной установленного масштаба. Кроме того, яркость изображения не остается постоянной в пределах экрана, так как изображение сигнала содержит участки, проходимые лучом с разной скоростью. Для получения одинаковой яркости изображения на экране используется принцип автоматической модуляции луча ЭЛТ. Уровень общей яркости изображения устанавливается для наиболее благоприятных условий наблюдения. Отметим, что выравнивание изображения по яркости увеличивает точность измерения, особенно в случаях, когда сигнал имеет участки с резко отличающейся скоростью изменения напряжения (например, импульс с крутыми фронтами). Так как фокусировка луча зависит от яркости, в современных осциллографах применяют систему автофокусировки. При этом напряжение на фокусирующих электродах ЭЛТ автоматически меняется при вариации яркости луча.

Перевод аналогового входного сигнала в цифровую форму позволяет автоматизировать не только процесс регулировки, но и процесс измерения и обработки сигнала.

Наиболее просто цифровая обработка сигнала реализуется в стробоскопических осциллографах, так как дискретизация сигнала во времени лежит в

основе принципа действия стробоскопического преобразователя. В цифровом устройстве проводится дискретизация сигнала только по уровню, результаты преобразования обрабатываются встроенным микропроцессором или внешним компьютером.

7.3. Запоминающие осциллографы

При исследовании одиночных сигналов и периодических сигналов с большой скважностью используют запоминающие осциллографы, основой которых являются запоминающие трубки.

Запоминающие электронно-лучевые трубки содержат те же элементы, что и ЭЛТ универсального осциллографа, а также дополнительно оснащаются узлом памяти и системой воспроизведения изображения. Узел памяти состоит из двух плоских сеточных электродов, расположенных параллельно экрану (рис. 7.10). Непосредственно у экрана находится мишень, покрытая слоем диэлектрика. Поверх мишени размещен другой электрод в виде сетки с более крупной структурой — коллектор.

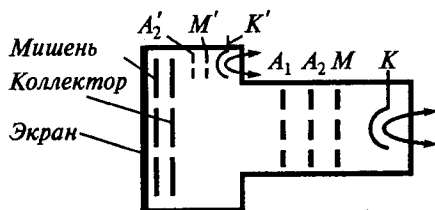


Рис. 7.10. Запоминающая ЭЛТ:
A'2, M', K' — воспроизводящая система

Изображение записывается электронным лучом высокой энергии (записывающий луч). Электроны луча оседают на мишени, причем количество заряда пропорционально току луча. При перемещении луча на мишени создается потенциальный рельеф, повторяющий форму осциллограммы. После прекращения действия сигнала потенциальный рельеф мишени сохраняется длительное время. Наблюдать записанное изображение позволяет воспроизводящая система, состоящая из подогреваемого катода K', анода A'2 и модулятора M' (см. рис. 7.10). Катод трубки создает поток электронов малой энергии, плотность которого регулируется модулятором M'. В результате формируется широкий расфокусированный пучок электронов, равномерно облучающий мишень. Потенциал мишени подобран таким образом, чтобы при отсутствии записанного изображения медленные электроны воспроизводящего пучка не могли через нее пройти. При наличии потенциального рельефа в этих точках мишени часть электронов проходит к экрану, вызывая его свечение. На экране появляется осциллограмма, повторяющая форму потенциального рельефа мишени. Стирается запись путем подачи на коллектор отрицательного импульса, выравнивающего потенциал мишени.

У запоминающей трубки можно выделить три характерных режима работы:

- наблюдение сигнала без записи изображения — на коллекторе небольшое положительное напряжение $U_{\text{кол}} = +50$ В, на мишени нулевой потенциал $U_{\text{миш}} = 0$, мишень прозрачна для быстролетающих электронов;

- режим записи — $U_{\text{кол}} = +50$ В, на мишень подается положительный потенциал $U_{\text{миш}} = 30$ В, и мишень становится менее прозрачна, в результате быстро летящие электроны выбивают вторичные электроны и создают на мишени положительный потенциальный рельеф, который может оставаться длительное время;

- режим воспроизведения — потенциал мишени снова становится нулевым $U_{\text{миш}} = 0$, кроме тех мест, где записан рельеф; мишень облучается широким потоком медленно летящих электронов с воспроизводящей системы, для этого потока мишень прозрачна только в местах рельефа, где записан сигнал.

Запоминающие ЭЛТ характеризуют следующие параметры:

- яркость свечения экрана в режиме воспроизведения — она регулируется напряжением модулятора системы воспроизведения и может быть высока, так как воспроизведение производится непрерывно;

- время воспроизведения изображения — это время в основном ограничивается устойчивостью потенциального рельефа к ионной бомбардировке; в современных ЭЛТ время воспроизведения может достигать десятков минут;

- время сохранения записи — оно определяется при снятом напряжении с ЭЛТ;

- скорость записи — характеризует быстродействие ЭЛТ в режиме запоминания; определяется временем, необходимым для создания потенциального рельефа достаточной величины.

Современные запоминающие ЭЛТ имеют скорость записи сигналов от 2,5 до 4000 км/с.

Матричная индикаторная панель. Новейшим типом отображающего устройства, применяемого в современных осциллографах с аналого-цифровым и полностью цифровым преобразованием исследуемого сигнала, является матричная индикаторная панель.

Она представляет собой совокупность расположенных определенным образом отдельных дискретных излучателей (газоразрядных, плазменных, жидкокристаллических, твердотельных и т.д.). На рис. 7.11 изображена конструкция матричной газоразрядной панели.

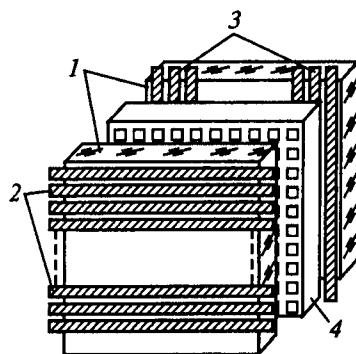


Рис. 7.11. Матричная индикаторная панель:

1 — стеклянные пластины; 2 — аноды;

3 — катоды; 4 — матрица

Матричная панель содержит две стеклянные пластины 1, на внешних поверхностях которых напылены тонкие проводящие полоски — аноды 2 и катоды 3. Аноды располагаются на лицевой пластине, через которую проходит световое излучение, поэтому их делают прозрачными. Между пластинами помещается диэлектрическая матрица 4 с отверстиями, образующими газоразрядные (или другие) ячейки в точках перекрестия электродов. Панель заполняют гелий-неоновой смесью и герметизируют. Изображение исследуемого сигнала воспроизводится поочередным свечением газоразрядных ячеек. Для этого со схемы управления панелью в каждый момент времени на аноды и катоды пластин подают соответственно положительный и отрицательный импульсы напряжений поджига. Номер анода, на который подается импульс напряжения поджига, определяет строку развертки, а номер катода — столбец; на их перекрестии располагается светящаяся ячейка панели. Такой принцип управления лучом развертки называют матричным, на практике его реализуют цифровыми методами и устройствами.

Преимущества матричных индикаторных панелей — малые габариты и вес, низкие напряжения питания. В них отсутствуют геометрические искажения, светящаяся точка стабильна. Разработаны панели с внутренней памятью, способные не только воспроизводить, но и запоминать изображение сигнала. Цифровой принцип управления позволяет достаточно просто совместить изображение сигнала с цифробуквенной индикацией его параметров на одном экране. К недостаткам матричных индикаторных панелей следует отнести сложность схемы управления, сравнительно невысокую разрешающую способность и низкое быстродействие.

Запоминающие цифровые осциллографы. В последние годы широкое применение в измерительной технике находят запоминающие цифровые осциллографы (ЗЦО). Структурная схема запоминающего цифрового осциллографа приведена на рис. 7.12.

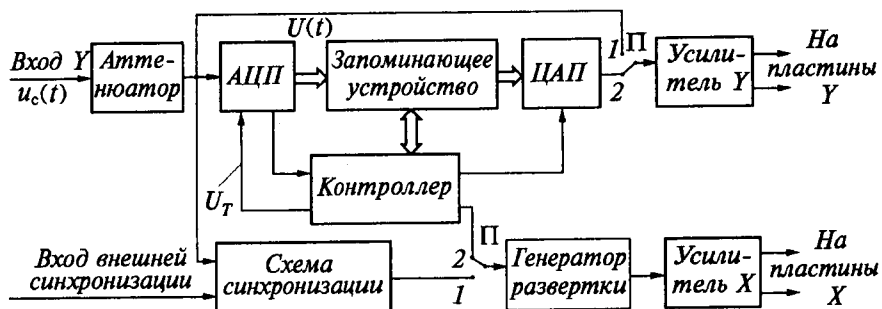


Рис. 7.12. Структурная схема запоминающего цифрового осциллографа

Осциллограф может работать в двух режимах. Если двоянный переключатель П находится в положении 1, то схема представляет обычный универсальный осциллограф, а если в положении 2 — то схема работает как ЗЦО.

Упрощенно принцип действия запоминающего цифрового осциллографа можно описать следующим образом. Исследуемый сигнал $u_c(t)$ с входа Y подается через аттенуатор на информационный вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Из контроллера (управляющего устройства) на АЦП подаются еще и тактовые импульсы U_T с периодом следования T . При поступлении в некоторый момент времени t_i одного из них, АЦП преобразует амплитуду сигнала $u_c(t_i)$ в двоичный код $U(t_i)$, т. е. набор кодовых чисел 0 и 1. В конце такого преобразования АЦП выдает на контроллер соответствующий сигнал. При этом цифровой код передается в определенную ячейку запоминающего устройства (ЗУ).

За время исследования сигнала $U(t)$ в ЗУ накапливаются коды его амплитуд $U(t_i)$, $U(t_i + T)$, $U(t_i + 2T)$ и т.д.; там они могут храниться любое время, поскольку ЗУ, как известно, — энергонезависимое устройство. Для воспроизведения хранимой информации по команде контроллера из памяти ЗУ выбираются (считываются) коды в требуемой последовательности и заданном темпе и подаются на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). ЦАП каждый код преобразует в соответствующее ему напряжение. Эти напряжения передаются через усилитель на пластины Y . Осциллограмма представляет собой набор светящихся точек. Для получения непрерывной осциллограммы после ЗУ устанавливают блок сглаживания — по существу фильтр нижних частот (на рис. 7.12 не показан).

Основные достоинства ЗЦО: практически неограниченное время хранения информации; широкие пределы скорости ее считывания; возможность замедленного воспроизведения отдельных участков запомненного сигнала; яркие и четкие осциллограммы; возможность обработки информации в цифровом виде на компьютере или внутри самого осциллографа с помощью встроенного микропроцессора. Основной недостаток ЗЦО — из-за сравнительно невысокого быстродействия АЦП большинство осциллографов могут запоминать сигналы, имеющие частоту не выше 40 МГц.

ЭЛТ как устройство отображения запоминающего осциллографа имеет ряд недостатков: большие габариты (длина), высокие питающие напряжения, сравнительно малая долговечность. Поэтому в последние годы в ЗЦО используются матричные газоразрядные и жидкокристаллические индикаторные панели.

7.4. Скоростные и стробоскопические осциллографы

При наблюдении и исследовании коротких импульсов (сигналов наносекундных длительностей) и колебаний СВЧ-диапазона возникает ряд сложностей, которые делают применение универсальных осциллографов затрудни-

тельным. Можно выделить шесть основных факторов, осложняющих применение для этих целей универсальных осциллографов:

- влияние емкости пластин трубки на крутизну фронта исследуемого сигнала;
- паразитные резонансы, возникающие в цепях, образуемых емкостью пластин и индуктивностью подводящих проводов, включая вводы пластин; паразитная резонансная частота должна быть намного больше высшей гармоники исследуемого сигнала;
- влияние конечного времени пролета электронов между пластинами ЭЛТ, которое составляет $1 \dots 10$ нс; если за время нахождения электрона между пластинами сигнал изменится, то отклонение электронного луча будет непредсказуемо;
- необходимо иметь очень широкую полосу пропускания канала Y ; полоса пропускания для передачи прямоугольного импульса приближенно может быть рассчитана по формуле $\Delta f \approx 2,5/\tau_n$, тогда при длительности импульса $\tau_n = 1$ нс полоса пропускания $\Delta f = 2,5$ ГГц;
- для наблюдения наносекундных импульсов и колебаний СВЧ требуются высокие скорости движения луча по экрану; так, например, для получения изображения импульса длительностью $\tau_n = 5$ нс на экране ЭЛТ шириной $L = 100$ мм скорость движения луча должна быть порядка $v = 20\,000$ км/с ($v = L/\tau_n$ — скорость движения луча, L — размер изображения на экране);
- изображение на экране может оказаться очень бледным, поскольку луч вычерчивает осциллограмму с огромной скоростью.

Все отмеченные недостатки требуется учитывать при разработке скоростных осциллографов. В скоростных осциллографах, работающих в реальном масштабе времени, применяются специальные ЭЛТ *бегущей волны*, что в результате не позволяет получить высокую чувствительность канала вертикального отклонения ($S_y \approx 1$ мм/В). Создание высокоскоростных разверток также встречает трудности; необходимо поднимать напряжение развертки до нескольких сотен вольт. Существующие серийные скоростные осциллографы имеют верхнюю граничную частоту $5 \dots 7,5$ ГГц.

При исследовании быстротекущих процессов с малой амплитудой напряжения, описанные скоростные осциллографы не пригодны из-за низкой чувствительности. Эта проблема решается с помощью специальной стробоскопической приставки (преобразователя) к универсальному осциллографу.

Стробоскопический метод осциллографирования дает возможность существенно уменьшить скорость развертки по сравнению с той, которая требуется при непосредственном наблюдении исследуемого сигнала на скоростном осциллографе. Стробоскопические осциллографы позволяют наблюдать очень короткие периодические импульсы и высокочастотные колебания. Они обладают большой чувствительностью, т.е. входные сигналы могут иметь малую амплитуду.

Стробоскопическим называют электронный осциллограф, в котором для получения на экране ЭЛТ формы сигнала используется отбор его мгновенных значений (выборки сигнала) и выполняется временное преобразование, т.е. изображение сигнала дается в увеличенном масштабе времени. По существу принцип действия заключается в преобразовании нескольких идентичных сигналов малой длительности в один, имеющий большую длительность и повторяющий форму входных сигналов. Скорость развертки уменьшают путем трансформации масштаба времени. На экране осциллографа появляется изображение, по форме подобное исследуемому сигналу, но в увеличенном временном масштабе.

Обобщенная структурная схема стробоскопического осциллографа кроме узлов, типичных для универсальных осциллографов, содержит стробоскопический преобразователь и устройство стробоскопической развертки, включающее генератор развертки, генератор строб-импульсов (они играют роль переносчиков информации о сигнале) и блок автоматического сдвига, задающий шаг считывания. Генератор развертки может работать в ждущем режиме, что позволяет исследовать повторяющиеся непериодические процессы.

Основным устройством осциллографа является стробоскопический преобразователь, в котором происходит дискретизация повторяющегося исследуемого сигнала с помощью кратковременных строб-импульсов. Структурная схема и временные диаграммы преобразователя входного сигнала приведены на рис. 7.13.

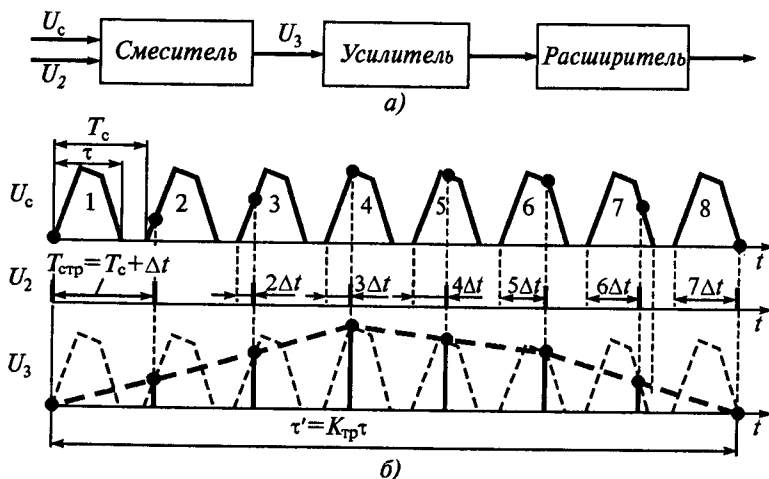


Рис. 7.13. Принцип работы преобразователя стробоскопического осциллографа:
а — схема; б — временные диаграммы

Исследуемые импульсы U_c , длительностью τ и периодом повторения T_c подаются вместе со строб-импульсами U_2 на стробоскопический смеситель преобразователя (рис. 7.13, а). Период следования строб-импульсов $T_{\text{стр}} = T_c + \Delta t$, где

Δt называется *шагом считывания*. Длительность Δt выбирают из условия $\Delta t = \tau/n$ (n — целое число). В результате этого преобразования оказывается, что первый строб-импульс совпадает с началом первого импульса U_c (1), 2-й — сдвинут от начала 2-го (2) импульса U_c на Δt , 3-й сдвинут от начала 3-го (3) импульса U_c на $2\Delta t$ и т. д. (рис. 7.13, б).

На выходе смесителя появляются короткие импульсы U_3 (жирные линии с точкой), совпадающие по времени со строб-импульсами (U_2), но имеющие амплитуду, равную амплитуде исследуемых импульсов U_c в момент поступления строб-импульсов U_2 . Поэтому импульсы U_3 называют *строб-импульсами, промодулированными по амплитуде исследуемым сигналом U_c* (рис. 7.13, б).

Как видно из диаграммы сигнала U_3 , *огibaющая промодулированных строб-импульсов* (жирная штриховая линия на рис. 7.13, б) практически *повторяет форму исследуемых импульсов U_c* , но по сравнению с ними *растянута во времени*. Импульсы U_3 усиливают, затем расширяют до требуемой длительности и подают через усилитель канала Y на отклоняющие пластины стробоскопического осциллографа. При этом на экране осциллографа с обычными ЭЛТ и пилообразной разверткой наблюдают форму импульсов U_c .

Для большей контрастности изображения плоские участки расширенного во времени исследуемого сигнала подсвечивают импульсами схемы подсвета луча. Таким образом изображение сигнала будет иметь вид светящихся черточек, что является характерным признаком осциллограммы стробоскопического осциллографа.

Степень растянутости наблюдаемого импульса во времени (временное преобразование) характеризуется *коэффициентом трансформации масштаба времени $K_{тр} = nT_{стр}/\tau$* , где n — число строб-импульсов, считывающих импульс U_c . Поскольку $n = \tau/\Delta t$, то

$$K_{тр} = T_{стр}/\Delta t. \quad (7.8)$$

В современных осциллографах $K_{тр}$ достигает десятков тысяч, что позволяет при обычных развертках наблюдать форму наносекундных импульсов. Полоса пропускания современных стробоскопических осциллографов превышает 10 ГГц; уровень входного сигнала — от нескольких милливольт до десятков вольт; погрешность измерения 5...7,5 %

7.5. Осциллографирование непрерывных и импульсных сигналов

Поскольку основным требованием, предъявляемым к каждому измерительному прибору, является минимальная погрешность измерения, то при выборе осциллографа следует в первую очередь обратить внимание на его такие технические характеристики, как частотный диапазон, чувствительность, размер экрана. При этом изображение должно занимать центральную

часть экрана и составлять 70...80 % его площади. В цифровых приборах это требование обычно выполняется автоматически. Ширина луча должна быть минимальной при достаточной яркости. Следует также обращать внимание на входные параметры осциллографа. Так, у некоторых осциллографов входное сопротивление порядка 1 МОм, что может оказывать шунтирующее действие на высокоомную исследуемую схему. То же неблагоприятное действие оказывает и входная емкость, которая вместе с емкостью соединительных проводов (кабелей) может составить несколько десятков пикофард. При измерении импульсов и напряжений высоких частот для соединений источников сигналов и внешних генераторов с осциллографом должны использоваться специальные высокочастотные кабели.

Измерение амплитуды и временных параметров сигнала

В универсальных осциллографах используется метод измерения амплитуд сигналов с помощью масштабной сетки, помещенной на экране осциллографа. Цена деления сетки устанавливается с помощью калибратора амплитуды.

Иллюстрация данного метода измерения представлена на рис. 7.14, где показаны периодические сигналы. Параметры импульсов определяются следующим образом: $U_p = C_y l_y$; U_p — размах (амплитуда импульса); $|C_y|$ — цена деления сетки по вертикали, В/дел; $T = C_x L_x$ — период следования импульсов; $\tau_n = C_x l_x$ — длительность импульса; $|C_x|$ — цена деления сетки по горизонтали, с/дел; l_y , L_x , l_x — выражены в делениях сетки.

Погрешность измерения амплитуды сигнала при этом методе измерения составляет 3...5 %. Существует ряд способов повысить точность измерения амплитуды исследуемого сигнала, например компенсационные методы. Эти методы чаще всего применяют только в цифровых осциллографах, что позволяет получить численные значения параметров с погрешностью 1...2 %.

В отличие от частотомеров и измерителей временных интервалов, с помощью осциллографов можно измерять параметры сигналов сложной временной структуры, например ступенчатых сигналов или сигналов кодовых последовательностей. Можно измерять параметры случайных и переходных процессов. Наиболее простым методом исследования является *метод калиброванной развертки* (калиброванных меток) (рис. 7.15). Реальная погрешность этого метода составляет порядка 10 % и зависит от количества меток.

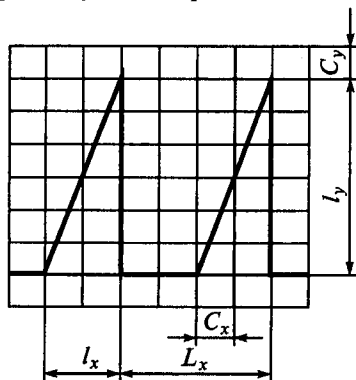


Рис. 7.14. Определение параметров сигнала с помощью масштабной сетки

Калибровочные метки известной частоты наносятся на изображение сигнала длительностью τ_n путем модуляции яркости луча, т. е. подачей на сетку ЭЛТ напряжения известной частоты $f_0 = 1/T_0$. При этом длительность сигнала $\tau_n = nT_0$, где n — количество калибровочных меток.

Остановимся на способе измерения по интерференционным фигурам, называемым *фигурами Лиссажу*. Измерение основано на сравнении неизвестной частоты f_x с известной частотой f_0 , воспроизводимой мерой. С этой целью колебания известной (образцовой) частоты f_0 подаются на один вход осциллографа (например, Y). На вход X (при этом собственная развертка осциллографа отключается) поступают колебания измеряемой частоты f_x . Частоту f_0 образцового генератора подстраивают так, чтобы на экране осциллографа наблюдалась простейшая устойчивая фигура, примерные виды которой при разных фазовых сдвигах показаны в табл. 7.1. Форма фигур Лиссажу зависит от отношения частот m/n и начальных фаз сравниваемых колебаний.

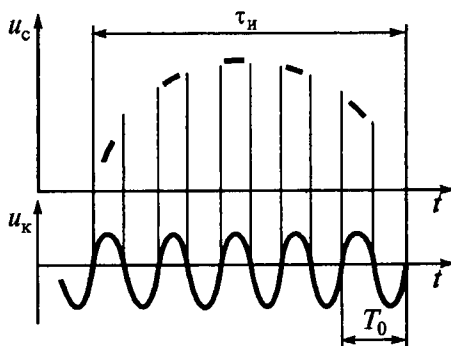


Рис. 7.15. Измерение интервалов времени с помощью калибровочных меток:

u_c — исследуемое напряжение,
 u_k — калибровочное напряжение

Таблица 7.1. Интерференционные фигуры при разных фазовых сдвигах

Соотношение частот	Начальный фазовый сдвиг колебания на входе Y, град.				
	0	45	90	135	180
$\frac{f_0}{f_x} = 1$					
$\frac{f_0}{f_x} = 2$					
$\frac{f_0}{f_x} = 3$					

Соотношение частот двух гармонических колебаний может быть определено как отношение числа точек пересечения фигуры Лиссажу m по вертикали к числу точек пересечения n по горизонтали. Например, как показано на рис. 7.16, это отношение составляет:

$$\frac{f_x}{f_o} = \frac{m}{n} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}.$$

Отсюда измеряемая частота определяется так: $f_x = f_o/2$.

Точность этого метода определения частоты колебания оказывается высокой и определяется стабильностью образцового генератора, однако получение и наблюдение таких фигур — достаточно сложная измерительная задача.

Осциллографирование импульсных сигналов

При измерении импульсных сигналов особое значение имеет правильное определение вида и параметров фронтов импульса. Основными влияющими факторами на правильное воспроизведение импульсного сигнала являются:

- частотный диапазон канала вертикального отклонения $\Delta F = f_v - f_n$, где f_v , f_n — соответственно верхняя и нижняя граничные частоты канала;
- переходная характеристика канала осциллографа.

Частотные свойства осциллографа отражаются параметрами его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) — зависимости размера изображения гармонического сигнала от его частоты. АЧХ характеризуют полосой пропускания, определяемой верхней граничной частоты f_v , отсчитываемой по уровню 0,707 от значения АЧХ на низких частотах. Среди других параметров отметим рабочий диапазон АЧХ, в пределах которого ее неравномерность не превышает погрешности измерения напряжения для данного осциллографа. Этот параметр определяет частотные границы измерения амплитуд гармонических сигналов с заданной точностью.

К параметрам переходной характеристики, представленной на рис. 7.17, относят время нарастания $\tau_{но}$ — интервал, в течение которого луч проходит от 0,1 до 0,9 от установившегося значения (уровня U_m) переходной характе-

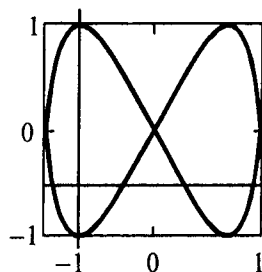


Рис. 7.16. К определению отношения частот

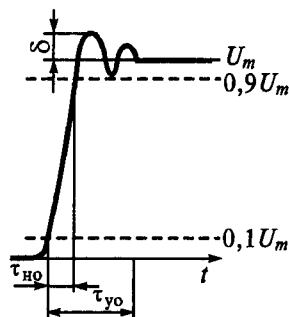


Рис. 7.17. Переходная характеристика осциллографа

ристики. Плоская часть переходной характеристики может быть с выбросом или с осцилляциями; в этих случаях используют дополнительные параметры: время установления τ_{yo} , отсчитываемое от уровня 0,1 до момента уменьшения осцилляций до заданного уровня; выброс определяется параметром δ . Время нарастания — основной параметр канала вертикального отклонения Y осциллографа.

Для исследования кратковременных сигналов необходим осциллограф, имеющий время нарастания не более 0,3 от длительности сигнала.

Учитывая изложенное, можно рекомендовать верхнюю границу частотного диапазона определять по формуле:

$$f_v = 2/\tau_n. \quad (7.9)$$

При этом длительность фронта импульса (рис. 7.18) следует уточнять согласно выражению:

$$\tau_\phi \cong \sqrt{\tau_{изм}^2 - \tau_{но}^2}, \quad (7.10)$$

где $\tau_{изм}$ — измеренное значение длительности фронта; $\tau_{но}$ — время нарастания фронта, определяемое по переходной характеристике осциллографа, должно быть не более 0,1...0,3 от длительности сигнала.

От нижней граничной частоты F_n зависит величина скоса ΔU_m вершины импульса (рис. 7.18). Эта граничная частота может быть определена из формулы:

$$F_n \leq \delta_n / (2\pi\tau_n),$$

где δ_n — допустимая относительная величина спада вершины импульса:

$$\delta_n = \Delta U_m / U_m.$$

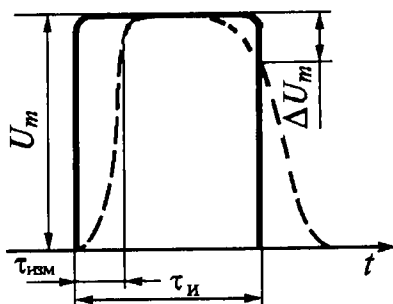


Рис. 7.18. Искажения формы прямоугольного импульса

7.6. Цифровые осциллографы

Цифровой осциллограф позволяет одновременно наблюдать на экране сигнал и получать численные значения ряда его параметров с большей точностью, чем это возможно путем считывания количественных величин непосредственно с экрана обычного осциллографа. Это возможно потому, что параметры сигнала измеряются непосредственно на входе цифрового осциллографа, тогда как сигнал, прошедший через канал вертикального отклоне-

ния, может быть измерен с существенными ошибками. Эти ошибки могут достигать 10 %.

Параметрами, измеряемыми современными цифровыми осциллографами, являются: амплитуда сигнала, его частота или длительность. На экране осциллографа, помимо собственно осциллограмм, отображается состояние органов управления (чувствительность, длительность развертки и т. п.). Предусмотрен вывод информации с осциллографа на печать и другие функциональные возможности. Однако этим не ограничиваются возможности цифровых осциллографов. Сопряжение цифровых осциллографов с микропроцессорами позволяет определять действующее значение напряжения сигнала и даже вычислять и отображать на экране преобразования Фурье для любого вида сигнала.

В устройствах цифровых осциллографов осуществляется полная цифровая обработка сигнала, поэтому в них, как правило, используется отображение на новейших индикаторных панелях.

В цифровых осциллографах отображение результата измерения производится тремя способами:

- параллельно с наблюдением динамического изображения сигнала на экране, его численные параметры высвечиваются на табло;
- оператор подводит к изображению сигнала на экране световые метки так, чтобы отметить измеряемый параметр, и по цифре на соответствующей регулировке определяет величину интересующего параметра;
- используются специальные кинескопы (например, матричные индикаторы) и растровый метод формирования изображения исследуемых сигналов и цифровой информации.

В современных цифровых осциллографах автоматически устанавливаются оптимальные размеры изображения на экране трубки. Ниже приводятся параметры современного цифрового автоматизированного осциллографа, который является характерным представителем этого класса приборов.

Структурная схема цифрового осциллографа содержит: аттенуатор входного сигнала; усилители вертикального и горизонтального отклонения; измерители амплитуды и временных интервалов; интерфейсы сигнала и измерителей; микропроцессорный контроллер; генератор развертки; схему синхронизации и электронно-лучевую трубку.

Технические характеристики типового современного цифрового осциллографа:

- полоса пропускания 0...100 МГц;
- коэффициенты отклонения 0,002...10 В/дел;
- коэффициенты развертки 20 нс/дел...20 мс/дел;
- погрешность коэффициентов отклонения и развертки 2...4 %;
- погрешность цифровых измерений 2...3 %;
- размер экрана 80×100 мм.

Функциональные возможности:
 автоматическая установка размеров изображения;
 автоматическая синхронизация;
 разностные измерения между двумя метками;
 автоматическое измерение размаха, максимума и минимума амплитуды сигналов, периода, длительности, паузы, фронта и спада импульсов;
 вход в канал общего пользования.

Из структурной схемы (рис. 7.19) видно, что амплитудные и временные параметры исследуемого сигнала определяются с помощью встроенных в прибор измерителей. На основании данных измерений микропроцессорный контроллер производит вычисление требуемых коэффициентов отклонения и развертки и через интерфейс устанавливает эти коэффициенты в аппаратной части каналов вертикального и горизонтального отклонения. Это обеспечивает неизменные размеры изображения по вертикали и горизонтали, а также автоматическую синхронизацию сигнала.

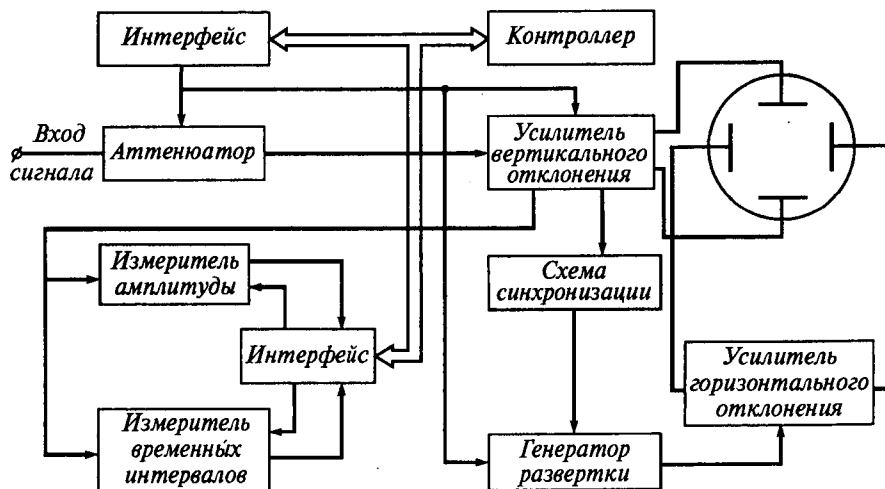


Рис. 7.19. Упрощенная структурная схема цифрового осциллографа

Микропроцессорный контроллер также опрашивает положение органов управления на передней панели, и данные опроса после кодирования снова поступают в контроллер, который через интерфейс включает соответствующий режим автоматического измерения. Результаты измерений индицируются на отдельном световом табло (оно может быть встроено в экран трубки), причем амплитудные и временные параметры сигнала отображаются одновременно.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяют осциллографы?
2. Какие блоки входят в состав структурной схемы универсального осциллографа? Их назначение?
3. Для чего применяется синхронизация разверток осциллографа? Основные типы синхронизации.
4. Для каких целей в осциллографах применяют калибраторы?
5. Каково назначение линейно-изменяющегося напряжения, подаваемого на горизонтальные пластины?
6. Электронно-лучевая трубка: устройство, принцип действия, основные параметры и характеристики.
7. Запоминающие осциллографы — принцип действия, параметры и основные режимы работы.
8. Каковы особенности осциллографирования импульсов наносекундной длительности?
9. В чем заключается принцип стробоскопического осциллографирования быстро-текущих процессов?
10. Основные требования к «развертываемому» напряжению. Как работает генератор пилообразного напряжения?
11. Перечислите основные виды разверток.
12. Когда используется линейная развертка?
13. Как осуществляется круговая развертка?
14. Как измеряется амплитуда сигналов с помощью осциллографа?
15. Как осуществляется измерение временных интервалов с помощью калиброванной развертки и яркостных меток?
16. Каким образом можно провести измерение частоты сигнала методом фигур Лиссажу.
17. Какие требования предъявляются к осциллографу при измерении импульсных сигналов?
18. Принципы построения цифровых осциллографов.
19. Из каких основных узлов состоит цифровой осциллограф?
20. Назовите основные параметры современного цифрового осциллографа.

Глава 8. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Измерение частоты и интервалов времени, а также хранение и воспроизведение их единиц лежат в основе многочисленных измерительных задач, решаемых в современной радиотехнике. Техническая аппаратура для частотно-временных измерений образует единый комплекс приборов и средств, обеспечивающий возможность проведения измерений с непосредственной их привязкой к Государственному эталону частоты и времени. Последнее определяет принципиально высокую точность измерений.

8.1. Общие сведения

Частота f или период T относятся к основным параметрам любого гармонического или периодического процесса. В общем случае под *частотой* понимают число идентичных событий, происходящих за единицу времени. Для периодических, но не гармонических колебаний строго справедливо лишь понятие периода. Однако и в этом случае часто говорят о частоте, понимая под этим величину, обратную периоду.

Единица *циклической частоты* f — герц (Гц) — соответствует одному колебанию за 1 с. Отметим, что исторически в радиотехнике высокие частоты принято обозначать буквой f , а низкие — F .

Напомним, что гармонический сигнал записывается как

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_0) = U \cos \varphi(t), \quad (8.1)$$

где U_m — амплитуда; ω — угловая (круговая) частота; φ_0 — начальная фаза; $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$ — полная (текущая, мгновенная) фаза.

Угловая частота $\omega = 2\pi f$ выражается в рад/с и равна изменению текущей фазы сигнала $\varphi(t)$ за единицу времени. Угловая частота записывается для высоких и низких частот соответственно как $\omega = 2\pi f$ и $\Omega = 2\pi F$. Для гармонических сигналов (в том числе и искаженных по форме, но не по периоду следования) частота определяется числом переходов через ось времени (т. е. через нуль) за единицу времени.

При непостоянстве частоты используется понятие *мгновенной угловой частоты* $\omega(t) = d\varphi(t)/dt = 2\pi f(t)$, где $f(t)$ — *мгновенная циклическая частота*. В настоящем разделе при описании методов измерения частоты имеется

в виду ее *среднее значение за время измерения*. Различают также *долговременную* и *кратковременную* нестабильности частоты, связанные соответственно с постоянным изменением частоты за длительный и короткий интервалы времени и с ее флуктуационными изменениями. Граница между этими нестабильностями условна и задается путем указания времени измерения.

Так как измерение частоты, по самому ее определению занимает определенный промежуток времени, то результатом измерения является усредненное на интервале времени $T_{\text{ср}}$ значение частоты и, следовательно, можно ожидать, что погрешность измерения частоты будет зависеть от времени усреднения.

Интервалом времени Δt в общем случае называется время, прошедшее между моментами двух последовательных событий. К числу таких интервалов относятся, например, период колебаний, длительность импульса или длительность интервала, определяемая разносом по времени двух импульсов.

Периодом T называется интервал времени, через который регулярно повторяются мгновенные значения гармонического или периодического сигнала $u(t)$. Отсюда следует, что $u(t) = u(t + nT)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Для гармонического сигнала, например для $u(t) = U_m \sin(2\pi t/T) = U_m \sin \varphi(t)$, период колебания T можно также определить, как интервал времени, в течение которого фаза сигнала $\varphi(t)$ (в радианах) изменяется на 2π .

Частота f и период колебания T дуальны (т. е. двойственны, равноправны) и связаны формулой $f = 1/T$. Поскольку эти две физические величины неразрывно связаны, измерение одной величины можно заменить другой. Но на практике чаще измеряется частота.

Аппаратура для частотно-временных измерений образует единый комплекс приборов, обеспечивающий возможность проведения измерений с непосредственной их привязкой к Государственному эталону частоты и времени. Это фактически гарантирует возможность принципиально высокой точности измерений.

Основными измерительными приборами и средствами частотно-временных измерений являются:

- осциллографы;
- приемники сигналов эталонных частот и компараторы;
- преобразователи частоты сигналов;
- частотомеры резонансные;
- частотомеры на основе метода заряда-разряда конденсатора;
- частотомеры цифровые;
- цифровые измерители частоты и интервалов времени.

Базой для частотно-временных измерений служит группа Государственных стандартов частоты — высокоточных мер частоты и времени, объединяющая рубидиевый, цезиевый, водородный и кварцевый стандарты. Привязка к ним практических измерений осуществляется приемниками сигналов эталонных частот, передаваемых радиостанциями Государственной службы

частот и времени, а также компараторами и преобразователями частоты сигнала. Последние применяются для переноса частоты или спектра измеряемого сигнала в тот диапазон частот, где наиболее целесообразно производить необходимое измерение.

В зависимости от участка частотного спектра и допустимой погрешности для измерения частоты применяют различные способы и приемы измерения, основанные как на использовании методов сравнения, так и методов непосредственной оценки.

В методах сравнения (*резонансный, гетеродинный и с помощью осциллографа*) используют сравнение измеряемой частоты с частотой источника образцовых колебаний. Эти методы применяются в основном для градуировки генераторов различных измерительных приборов. На основе метода сравнения действуют осциллографические способы измерения частоты и гетеродинные частотомеры. Для их реализации необходим образцовый генератор более высокой точности и устройство сравнения (сличения) частот. Перечислим методы, основанные на использовании осциллографа в качестве устройства сравнения:

- определение частоты методом фигур Лиссажу;
- определение интервалов времени (периода, длительности импульса и т.д.) с использованием калиброванной развертки осциллографа;
- определение частоты с помощью яркостных меток на круговой развертке.

Первые два из перечисленных методов рассмотрены в главе 7. Третий метод реализуется при условии, что неизвестная частота f_x больше образцовой f_0 . Круговая развертка создается при подведении к входам Y и X осциллографа гармонических сигналов образцовой частоты f_0 , сдвинутых взаимно по фазе на 90° . Подавая гармонический сигнал с измеряемой частотой f_x на вход Z модуляции яркости луча осциллографа и регулируя частоту f_0 , можно получить практически неподвижную модулированную по яркости круговую развертку (рис. 8.1).

Если N — число ярких дуг (или темных промежутков между дугами) на круговой развертке, то частота $f_x = N f_0$ (на рис. 8.1, $f_x = 8 f_0$).

Все осциллографические методы имеют невысокую точность (относительная погрешность измерений порядка $10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$). Верхняя граница диапазона измеряемых частот определяется параметрами осциллографа и для большинства из них не превышает 500 МГц.

К приборам, работающим по методу непосредственной оценки, относятся резонансные частотомеры и измерители частоты, использующие метод заряда и разряда конденсатора.

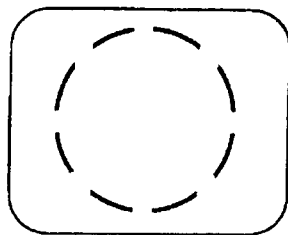


Рис. 8.1. Модулируемая по яркости круговая развертка

Современное измерение частоты методом непосредственной оценки главным образом выполняется электронно-счетным, или *цифровым (дискретного счета)* методом, на основе которого создаются цифровые (электронно-счетные — ЭСЧ) частотомеры. К достоинствам этого метода относится высокая точность измерений, широкий диапазон измеряемых частот, возможность обработки результатов наблюдений с помощью вычислительных устройств (микропроцессоров, персональных компьютеров и пр.). Цифровые частотомеры позволяют измерять не только частоту колебаний, но и интервалы времени.

8.2. Резонансный метод измерения частоты

Принцип действия резонансного метода основан на сравнении измеряемой частоты f_x с собственной резонансной частотой f_p градуированного колебательно-го контура или резонатора. Обычно данный метод применяется в диапазонах высоких частот и СВЧ, но может использоваться и в более низком диапазоне. Измерительные приборы, работающие на основе этого метода, называются *резонанс-*

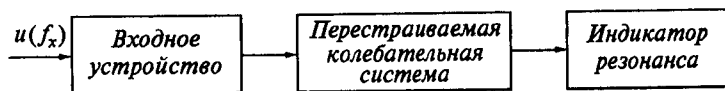


Рис. 8.2. Обобщенная структурная схема резонансного частотомера

ными частотомерами; их обобщенная структурная схема приведена на рис. 8.2.

Перестраиваемая колебательная система возбуждается сигналом источника измеряемой частоты $u(f_x)$ через входное устройство. Интенсивность колебаний в колебательной системе резко увеличивается в момент резонанса, т.е. при $f_x = f_p$. Данный момент фиксируется с помощью индикатора резонанса, связанного с колебательной системой, и значение измеряемой частоты f_x считывается с градуированной шкалы механизма настройки.

В качестве колебательной системы на частотах до сотен МГц используют колебательные контуры; на частотах до 1 ГГц — контуры с распределенными постоянными типа отрезков коаксиальной линии; на частотах, превышающих 1 ГГц, — объемные резонаторы.

На рис. 8.3 приведена упрощенная структурная схема резонансного частотомера (волномера) с объемным резонатором, включающая волновод 1, по которому посту-

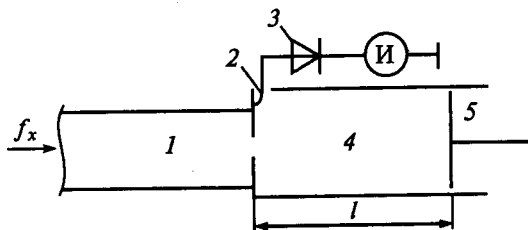


Рис. 8.3. Упрощенная структурная схема резонансного частотомера

пает энергия измеряемой частоты f_x , петлю связи 2, детектор (полупроводниковый диод) 3 с индикатором резонанса И, объемный резонатор 4 и плунжер 5, предназначенный для изменения одного из размеров резонатора и связанный с отсчетной шкалой. Связь резонатора с детектором индуктивная и осуществляется петлей связи 2.

Линейный размер резонатора l в момент настройки в резонанс однозначно связан с длиной волны λ возбуждаемых в нем электромагнитных колебаний. Резонанс наступает при длине резонатора $l = n\lambda/2$, где $n = 1, 2, 3$ и т. д. Поэтому, перемещая плунжер 5 до момента получения первого резонанса, а затем следующего и оценивая по отсчетной шкале разность $\Delta l = l_1 - l_2 = \lambda/2$, можно определить длину волны λ . Здесь l_1 и l_2 — показания отсчетной шкалы в момент 1-го и 2-го резонансов. Измеряемая частота f_x вычисляется по формуле $f_x = c/\lambda$, где c — скорость распространения света в вакууме.

Чтобы увеличить точность измерений частоты, необходимо повышать добротность Q резонаторов. С этой целью их внутренние поверхности полируют и серебрят, доводя величину Q до значения $(5...10)10^3$. С целью уменьшения сопротивления в месте подвижного контакта плунжера с резонатором применяют системы длинных линий (отрезки линий длиной $\lambda/2, \lambda/4$).

Резонансные частотомеры (волномеры) имеют простое устройство и достаточно удобны в эксплуатации. Наиболее точные из таких приборов обеспечивают измерение частоты с относительной погрешностью $10^{-3}...10^{-4}$. Основными источниками погрешностей измерения являются погрешность настройки в резонанс, погрешность шкалы и погрешность считывания данных.

8.3. Гетеродинный метод измерения частоты

Гетеродинный метод является одной из разновидностей методов сравнения измеряемой частоты f_x с частотой эталонного генератора — гетеродина. Этот метод использует принцип построения схем с нулевыми биениями.

Упрощенная структурная схема гетеродинного частотомера представлена на рис. 8.4. Она содержит: входное устройство, кварцевый генератор, смеситель, гетеродин, усилитель низкой частоты и индикатор (нулевых биений).

Действие гетеродинного частотомера сводится к следующему простому принципу: при переключении ключа K в положение 1 производится калиб-

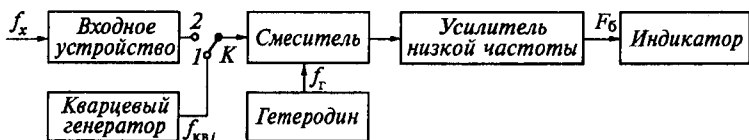


Рис. 8.4. Упрощенная структурная схема гетеродинного частотомера

ровка шкалы гетеродина; при положении 2 — измерение частоты f_x , подаваемой на входное устройство.

Калибровка шкалы гетеродина (ключ K находится в положении 1) осуществляется непосредственно перед проведением измерения с помощью дополнительного, кварцевого генератора. Сигнал, поступающий с кварцевого генератора, имеет сложную форму и содержит ряд гармонических составляющих с кратными частотами: $f_{кв1}, f_{кв2}, \dots, f_{квi}, \dots, f_{квn}$, где n — номер гармоники. Частоты этих гармоник кварцевого генератора в радиотехнике называются *кварцевыми точками*.

Отсчетный лимб гетеродина устанавливают в положение, соответствующее ближайшей к измеряемой частоте f_x кварцевой точке (примерное значение измеряемой частоты должно быть известно, иначе процесс измерения очень усложняется). Сигналы с кварцевого генератора $f_{квi}$ и гетеродина f_r поступают на смеситель, поэтому на его выходе возникают колебания с суммарными, разностными и комбинационными частотами. Индикаторный прибор фиксирует наличие сигнала биений на минимальной разностной частоте $F_6 = |f_{квi} - f_r|$, проходящего через усилитель низкой частоты (высокочастотные составляющие, получающиеся в результате смещения частот кварцевого генератора и гетеродина, через усилитель низкой частоты не проходят). Меняя емкость в контуре гетеродина, получают нулевые биения, следовательно, частота гетеродина становится равной частоте кварцевой гармоники $f_r \approx f_{квi}$.

После этого приступают к измерению неизвестной частоты f_x , переводя ключ K в положение 2. Вращая отсчетный лимб гетеродина, добиваются нулевых биений и по откорректированной шкале гетеродина определяют значение $f_x \approx f_r$.

Гетеродинные частотомеры являются достаточно точными измерительными приборами. Их относительная погрешность измерения лежит в пределах $10^{-3} \dots 10^{-5}$. Однако в диапазоне средних частот (до 300 МГц и ниже) их вытесняют электронно-счетные частотомеры, которые обеспечивают ту же высокую точность, но значительно проще в эксплуатации.

В диапазоне СВЧ-колебаний гетеродинный метод измерения частоты применяется совместно с цифровыми методами. Расширение предела измерения до 10...12 ГГц достигается за счет переноса (преобразования) измеряемой частоты в область более низких частот. Такой перенос можно осуществить, например, с помощью *дискретного гетеродинного преобразователя частоты*, структурная схема которого вместе с цифровым частотомером приведена на рис. 8.5.

В составе цифрового частотомера содержится генератор опорной (эталонной, образцовой) частоты f_0 . Эта частота поступает на нелинейный элемент (генератор гармоник), который формирует сетку гармонических составляющих $f_n = n f_0$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ — целые числа. С помощью перестраи-

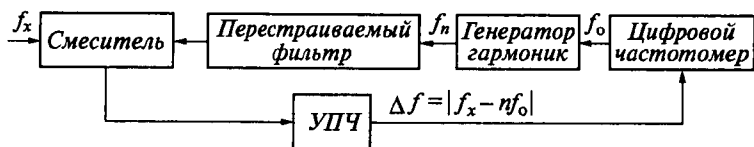


Рис. 8.5. Структурная схема дискретного гетеродинного преобразователя

ваемого фильтра (обычно это объемный резонатор с отсчетной шкалой) добиваются выделения из них гармоники f_n , ближайшей к измеряемой частоте f_x . При этом на выходе смесителя появляется сигнал с разностной частотой $\Delta f = |f_x - nf_0|$.

Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) имеет полосу пропускания, соизмеримую с разностной частотой Δf .

Результат измерения неизвестной частоты f_x колебаний вычисляют по формуле $f_x = nf_0 \pm \Delta f$, в которой номер гармоники n считается со шкалы перестраиваемого фильтра. Поскольку последнее выражение неоднозначно, то для получения наиболее точного результата проводят второе измерение, выбирая с помощью перестраиваемого фильтра гармонику $(n \pm 1)f_0$, соседнюю с гармоникой nf_0 . Если результаты вычисления частоты f_x совпали при двух измерениях, то они считаются верными.

8.4. Измерение частоты методом заряда и разряда конденсатора

Использование метода заряда и разряда конденсатора позволяет создавать простые в эксплуатации и недорогие частотомеры, работающие в диапазоне 0,02...1 МГц, но имеющие сравнительно невысокую точность. Их относительная приведенная погрешность может достигать 5 %. Принцип действия конденсаторного частотомера может быть пояснен с помощью схемы на рис. 8.6, а. Входной периодический сигнал любой формы неизвестной частоты $u(f_x)$ преобразуется с помощью преобразователя в импульсный управляющий сигнал $u_{упр}$ типа меандр, имеющий ту же частоту.

На рис. 8.6, б показан простейший принцип преобразования входного синусоидального колебания в колебание типа меандр $u_{упр}$ и сопутствующие сигналы. Сигнал $u_{упр}$ управляет ключом K : при положительной полярности ключ замкнут, при отрицательной — разомкнут.

При замкнутом положении ключа емкость C заряжается от источника напряжения E током i_z , протекающим через сопротивление R_1 и диод D_1 . При разомкнутом ключе данная емкость разряжается током i_p , протекающим через диод D_2 , измерительный прибор mA и сопротивление R . Чтобы заряд конденсатора происходил медленнее, чем разряд, требуется, чтобы $R_1 > R$.

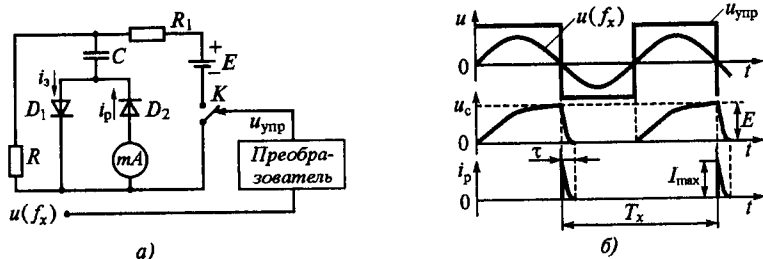


Рис. 8.6. Конденсаторный частотомер:
а — структурная схема; б — временные диаграммы к схеме

Непременным условием работы подобного частотомера является требование того, чтобы емкость в течение зарядного времени успела полностью зарядиться до некоторого постоянного значения E , а при разряде — напряжение на емкости практически становилось нулевым. Тогда максимальное значение разрядного тока i_p будет оставаться неизменным и равно $I_{\max}$, время разряда $\tau = RC$ постоянным. При этом среднее значение тока, протекающего через измерительный прибор, определится формулой:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{T_x} \int_0^{\tau} I_{\max} dt. \quad (8.2)$$

Итак, показания измерительного прибора пропорциональны частоте $f_x = 1/T_x$:

$$I_{\text{cp}} = f_x I_{\max} \tau. \quad (8.3)$$

Измерение частоты методом заряда и разряда конденсатора в настоящее время используется крайне редко и он приведен здесь исключительно для целей ознакомления.

8.5. Цифровой метод измерения частоты

Цифровой (дискретного счета) метод измерения частоты реализован в цифровых частотомерах. Принцип действия цифрового частотомера основан на измерении частоты в соответствии с ее определением, т. е. на счете числа импульсов за интервал времени. Данные приборы удобны в эксплуатации, имеют широкий диапазон измеряемых частот (от нескольких герц до сотен мегагерц) и позволяют получить результат измерения с высокой точностью (относительная погрешность измерения частоты $10^{-6} \dots 10^{-9}$).

Поскольку цифровые частотомеры являются многофункциональными измерительными приборами, то в зависимости от режима их работы можно

проводить измерение не только частоты и отношения двух частот, но и интервалов времени (периода следования периодических сигналов и интервала, заданного временным положением двух импульсов).

Принцип измерения частоты гармонического сигнала цифровым методом поясняет рис. 8.7, где приведены структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения частоты и временные диаграммы к его работе.

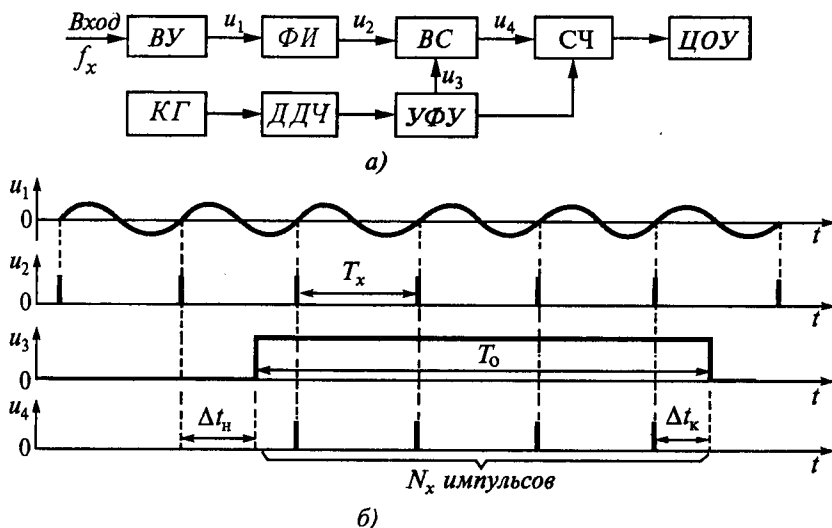


Рис. 8.7. Цифровой частотомер:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

Исследуемый гармонический сигнал частоты f_x подается на входное устройство (ВУ), усиливающее или ослабляющее его до значения, требуемого для работы последующего устройства частотомера (рис. 8.7, а). Снимаемый с выхода ВУ гармонический сигнал u_1 (рис. 8.7, б) поступает на формирователь импульсов (ФИ), преобразующий его в последовательность коротких однополярных импульсов u_2 , следующих с периодом $T_x = 1/f_x$ и называемых *счетными*. Причем передние фронты этих импульсов практически совпадают с моментами перехода сигнала u_1 через нулевое значение на оси времени при его возрастании. Схемотехнически формирователь ФИ состоит из усилителя-ограничителя и компаратора (триггера Шмитта).

Счетные импульсы u_2 поступают на один из входов временного селектора (ВС), на второй вход которого от устройства формирования и управления (УФУ) подается *строб-импульс* u_3 прямоугольной формы и калиброванной длительности $T_0 > T_x$. Интервал времени T_0 называют *временем счета*.

Временной селектор открывается строб-импульсом u_3 , и в течение его длительности пропускает группу (пакет) из N_x импульсов u_2 на вход счетчика (СЧ). В результате с временного селектора на счетчик поступает пакет из N_x импульсов u_4 . Первый счетный импульс, попавший во временные ворота T_0 строб-импульса (рис. 8.7, б), опережает его передний фронт на время Δt_n , а срез ворот и последний счетный импульс, появляющийся до среза, разделяет интервал Δt_k . Из рис. 8.7, б следует, что

$$T_0 = N_x T_x - \Delta t_n + \Delta t_k = N_x T_x - \Delta t_d, \quad (8.4)$$

где Δt_n и Δt_k — абсолютные погрешности дискретизации начала и конца интервала T_0 , вызванные случайным положением строб-импульса относительно счетных импульсов u_2 ; $\Delta t_d = \Delta t_n - \Delta t_k$ — общая абсолютная погрешность дискретизации.

Пренебрегая в формуле (8.4) погрешностью Δt_d , получаем, что число импульсов в пакете $N_x = T_0 / T_x = T_0 f_x$ и, следовательно, измеряемая частота пропорциональна числу счетных импульсов, поступающих на счетчик:

$$f_x = N_x / T_0. \quad (8.5)$$

Для формирования строб-импульса на устройство УФУ поступают короткие импульсы с периодом T_0 (на рисунке для упрощения не показаны) от схемы, включающей кварцевый генератор (КГ) образцовой частоты $f_{\text{кв}}$ и декадный делитель частоты (ДДЧ) следования импульсов с коэффициентом деления K_d (каждая декада уменьшает частоту $f_{\text{кв}}$ в десять раз). Период импульсов на выходе декадного делителя частоты и длительность строб-импульса равны периоду сигнала на выходе делителя частоты, т.е. $T_0 = K_d / f_{\text{кв}}$. Поэтому выражение (8.5) удобнее представить в виде

$$f_x = N_x f_{\text{кв}} / K_d. \quad (8.6)$$

Отношение $f_{\text{кв}} / K_d$ можно дискретно изменять вариацией K_d , т.е. за счет изменения числа декад декадного делителя частоты.

Счетчик подсчитывает число импульсов N_x и выдает соответствующий код в цифровое отсчетное устройство (ЦОУ). Отношение $f_{\text{кв}} / K_d$ выбирается равным 10^n Гц, где n — целое число. При этом ЦОУ отображает число N_x , соответствующее измеряемой частоте f_x в выбранных единицах. Например, если за счет изменения K_d выбран коэффициент $n = 6$, то число N_x , отображаемое на ЦОУ, соответствует частоте f_x , выраженной в МГц. Перед началом измерений УФУ сбрасывает показания счетчика в нуль.

Погрешность измерения частоты f_x этим методом имеет систематическую и случайную составляющие.

Систематическая составляющая погрешности измерения вызывается в основном долговременной нестабильностью частоты кварцевого генератора

$f_{\text{кв}}$. Ее уменьшают путем термостатирования кварца или за счет применения в кварцевом генераторе элементов с термокомпенсацией. При этом относительное изменение частоты $f_{\text{кв}}$ за сутки обычно не выше $\delta_{\text{кв}} = 5 \cdot 10^{-9}$. Погрешность за счет неточности установки номинального значения частоты $f_{\text{кв}}$ уменьшается калибровкой кварцевого генератора по сигналам эталонных значений частоты, передаваемых по радио, или с помощью перевозимых квантовых стандартов частоты. Относительная погрешность калибровки кварцевого генератора не превосходит $(1...5)10^{-10}$.

Очень часто требуемая стабильность частоты обеспечивается введением в схему кварцевого генератора системы фазовой автоподстройки (ФАПЧ).

Случайная составляющая погрешности измерения определяется *погрешностью дискретизации* $\Delta t_{\text{д}} = \Delta t_{\text{н}} - \Delta t_{\text{к}}$. Поскольку взаимная синхронизация строб-импульса и счетных импульсов отсутствует, погрешности $\Delta t_{\text{н}}$ и $\Delta t_{\text{к}}$, определяющие на рис. 8.7, б положение начала и конца строб-импульса между соседними двумя счетными импульсами, могут принимать во времени с одинаковой вероятностью значения от нуля до T_0 . Поэтому погрешности $\Delta t_{\text{н}}$ и $\Delta t_{\text{к}}$ являются случайными и распределены по равномерному закону. Вследствие независимости этих погрешностей общая погрешность дискретизации $\Delta t_{\text{д}}$ распределена по треугольному закону с предельными значениями $\pm T_0$.

Максимальную погрешность дискретизации начала и конца интервала времени счета T_0 , т. е. $\Delta t_{\text{д}} = \pm T_0$, удобно учитывать через эквивалентное случайное изменение числа счетных импульсов N_x на ± 1 импульс. При этом *максимальная абсолютная погрешность дискретизации* может быть определена разностью значений частоты f_x , получаемой по формулам (8.4) или (8.5) при $N_x \pm 1$; в этом случае $\Delta f_x = \pm 1/T_0$. Соответствующая *максимальная относительная погрешность* измерения:

$$\delta = \Delta f_x / f_x = \pm 1/N_x = \pm 1/(T_0 f_x).$$

Суммарная относительная погрешность измерения частоты цифрового частотомера нормируется в процентах и определяется величиной

$$\delta_{f_x} = \pm 100 \sqrt{\delta_{\text{кв}}^2 + \left(\frac{1}{T_0 f_x} \right)^2}. \quad (8.7)$$

Отсюда следует, что суммарная относительная погрешность измерения из-за погрешности дискретизации увеличивается по мере уменьшения измеряемой частоты f_x . При достаточно малой частоте f_x она может превзойти допустимое значение даже при максимальном времени счета T_0 , которое в цифровых частотомерах обычно не превышает 1 или 10 с. В этом случае целесообразно измерить период $T_x = 1/f_x$, а затем вычислить искомую частоту f_x .

Для уменьшения влияния погрешности дискретизации на результат измерения частоты f_x можно провести ее многократные наблюдения, а затем выполнить их статистическую обработку в порядке, указанном в разделе 3.2.

Диапазон измеряемых частот цифровых частотомеров ограничен снизу погрешностью дискретизации, а сверху — конечным быстродействием используемых счетчиков и делителей частоты. Верхний предел измерения частоты достигает 500 МГц, и его расширяют способом гетеродинного преобразования (переноса) измеряемой частоты в область более низких частот. Один из способов такого преобразования рассмотрен в предыдущем разделе.

Необходимо отметить, что в структурную и принципиальную схемы цифрового частотомера обязательно включают схемы автоматической регулировки усиления (АРУ) и подавления внешних помех. При малом уровне входного сигнала (ниже милливольт) измерения прекращаются и показания счетчика сбрасываются на нуль. В устройстве предусмотрены также меры защиты от перегрузок.

В современных цифровых частотомерах широко применяются кварцевые синтезаторы частот, создающие сигналы с дискретной сеткой частот. Цифровые частотомеры с программно-управляемыми синтезаторами частот и микропроцессорами являются перспективными измерительными приборами благодаря высокой точности, широкому диапазону измеряемых частот, надежности и удобству включения в автоматизированные измерительные системы.

8.6. Цифровой метод измерения интервалов времени

Решение многих радиотехнических задач связано с измерением интервалов времени. Обычно приходится измерять как очень малые (единицы пикосекунд) так и очень большие (сотни секунд) интервалы времени. Интервалы времени могут также быть не только повторяющимися, но и однократными.

Различают два основных способа измерения интервалов времени: осциллографический и цифровой.

Измерение интервалов времени с помощью осциллографа проводится по осциллограмме исследуемого напряжения с использованием «линейной» развертки. Из-за нелинейности развертки, а также больших погрешностей отсчета начала и конца интервала общая погрешность измерения составляет единицы процентов. В последние годы интервалы времени в основном измеряются цифровыми методами.

Измерения интервалов времени с помощью цифрового частотомера

Принцип измерения периода гармонического сигнала цифровым методом с помощью цифрового частотомера поясняется рис. 8.8, где приведены структурная схема устройства и соответствующие его работе временные диаграммы. Измерение интервала времени T_x цифровым методом основано на запол-

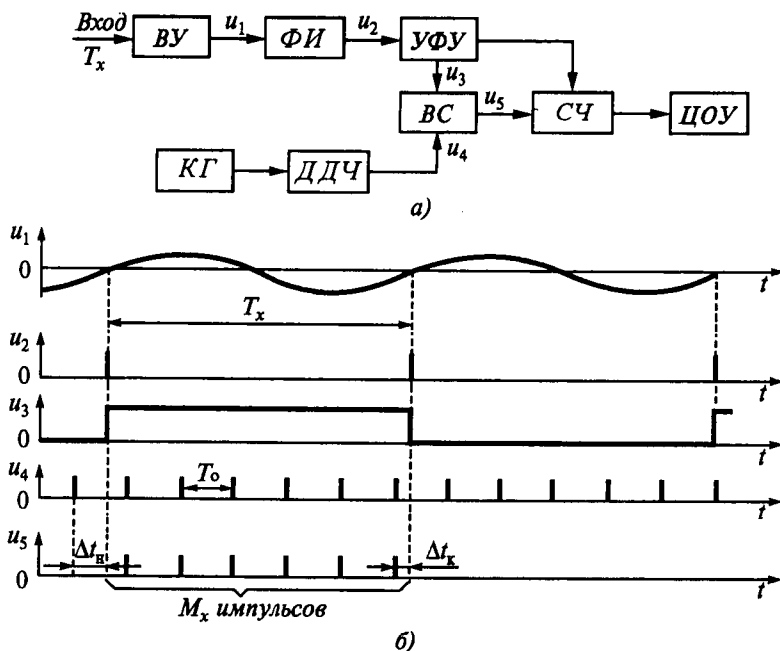


Рис. 8.8. Цифровой частотомер в режиме измерения периода синусоиды:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

нении его импульсами, следующими с образцовым периодом T_0 , и подсчете числа M_x этих импульсов за время T_x .

Основные элементы устройства и их действие были проанализированы в предыдущем разделе. В данном случае гармонический сигнал, период T_x которого требуется измерить, после прохождения входного устройства (БУ) (u_1 — выходной сигнал БУ) и формирователя импульсов (ФИ) преобразуется в последовательность коротких импульсов u_2 с измеряемым периодом. В устройстве формирования и управления из них формируется строб-импульс u_3 прямоугольной формы и длительностью T_x , поступающий на один из входов временного селектора (ВС). На второй вход этого селектора подаются короткие импульсы u_4 с образцовым периодом следования T_0 , сформированные деkadным делителем частоты (ДДЧ) из колебаний кварцевого генератора (КГ).

Временной селектор пропускает на счетчик (СЧ) число M_x счетных импульсов u_5 в течение интервала времени T_x , равном длительности строб-импульса u_3 .

Из рис. 8.8, б следует, что измеряемый период определяется как

$$T_x = M_x T_0 - \Delta t_d, \quad (8.8)$$

где $\Delta t_d = \Delta t_n - \Delta t_k$ — общая погрешность дискретизации (дискретности); Δt_n и Δt_k — погрешности дискретизации начала и конца периода T_x .

Без учета в формуле (8.8) погрешности Δt_d число импульсов, поступившее на счетчик, $M_x = T_x/T_o$, а измеряемый период пропорционален M_x :

$$T_x = M_x T_o. \quad (8.9)$$

Выходной код счетчика, поступающий на цифровое отсчетное устройство, соответствует числу подсчитанных им счетных импульсов M_x , а показания ЦОУ — периоду T_x , поскольку период следования счетных импульсов u_s необходимо выбирать из соотношения $T_o = 10^{-n}$, где n — целое число. В частности, при $n = 6$, ЦОУ отображает число M_x , соответствующее периоду T_x , выраженный в микросекундах.

Погрешность измерения периода T_x , как и при измерении частоты, имеет систематическую и случайную составляющие.

Систематическая составляющая зависит от относительной стабильности $\delta_{\text{кв}}$ образцовой частоты кварцевого генератора, а случайная определяется в основном погрешностью дискретизации Δt_d , рассмотренной в разделе 8.5. Максимальное значение этой погрешности удобно учитывать через эквивалентное изменение числа счетных импульсов M_x на ± 1 . При этом максимальная абсолютная погрешность дискретизации может быть определена разностью двух значений периода T_x , получаемых по формуле (8.9) при числах $M_x \pm 1$ и M_x , и равна $\Delta T_x = \pm T_o$. Соответствующая максимальная относительная погрешность $\delta = \pm \Delta T_x/T_x = \pm 1/M_x = \pm 1/(T_x f_o)$, где $f_o = 1/T_o$ — значение образцовой частоты кварцевого генератора.

На погрешность измерения влияют также шумы в каналах формирования строб-импульса u_3 и импульсов u_4 (рис. 8.8, а), вносящие в их положение временную модуляцию по случайному закону. Однако в реальных приборах с большим отношением сигнал/шум погрешность измерения за счет влияния шума пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью дискретизации.

Суммарная относительная погрешность измерения периода определяется в процентах по формуле:

$$\delta_{T_x} = \pm 100 \sqrt{\delta_{\text{кв}}^2 + \left(\frac{1}{T_x f_o} \right)^2}. \quad (8.10)$$

Из выражения (8.10) следует, что из-за погрешности дискретизации погрешность измерения периода T_x резко увеличивается при его уменьшении. Повышения точности измерений можно добиться за счет увеличения частоты f_o кварцевого генератора (путем умножения его частоты в K_y раз), т.е. путем увеличения числа счетных импульсов M_x . С этой же целью в схему после

входного устройства вводят делитель частоты исследуемого сигнала с коэффициентом деления K (на рис. 8.8, a не показан). При этом выполняется измерение K исследуемых периодов T_x и в такое же раз уменьшается относительная погрешность дискретизации.

Погрешность дискретизации можно уменьшить и способом измерений с многократными наблюдениями. Однако это значительно увеличивает время измерений. Поэтому разработаны методы, уменьшающие погрешность дискретизации с малым увеличением времени измерения. Это метод интерполяции и нониусный метод.

Метод интерполяции. Суть этого метода состоит в том, что помимо целого числа периодов счетных импульсов, заполняющих измеряемый интервал времени, учитываются и дробные части периода, заключенные между началом интервала и первым счетным импульсом, а также между последним счетным импульсом и концом интервала.

Принцип измерения временных интервалов методом интерполяции поясняет рис. 8.9.

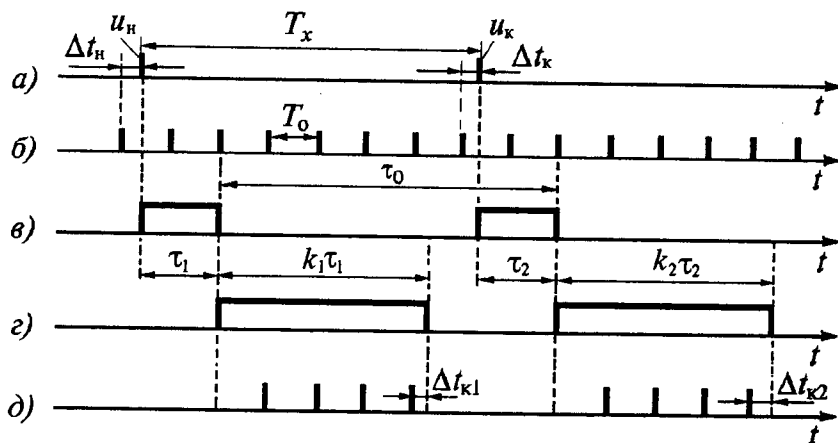


Рис. 8.9. Измерение временного интервала методом интерполяции:

- a — измеряемый интервал; $б$ — счетные импульсы;
- $в$ — вспомогательные расширенные интервалы; $г$ — основные расширенные интервалы;
- $д$ — группы счетных импульсов расширенных интервалов

Пусть измеряется интервал времени T_x , начало и конец которого заданы положением импульсов u_n и u_k соответственно (рис. 8.9, a). При этом предполагается, что начало измеряемого интервала не связано синхронно со счетными импульсами, приведенными на рис. 8.9, a , $б$.

Для уменьшения составляющих погрешности дискретизации Δt_n и Δt_k в начале и конце интервала T_x , можно расширить в k раз интервалы Δt_n и Δt_k и

измерять их, заполнив счетными импульсами. Учитывая еще и погрешности расширителей, на практике расширяют эти интервалы до большей длительности. Ими могут быть, например, вспомогательные расширенные интервалы $\tau_1 = 2T_0 - \Delta t_n$ и $\tau_2 = 2T_0 - \Delta t_k$ (рис. 8.9, в). Чтобы еще уменьшить погрешности дискретизации, вспомогательные интервалы можно в свою очередь также расширить. Полученные основные расширенные интервалы имеют длительности $k_1\tau_1$ и $k_2\tau_2$ соответственно (рис. 8.9, з), где k_1 и k_2 — коэффициенты расширения. Расширители строят, используя обычно способ заряда и разряда конденсатора с разной скоростью.

Основные расширенные интервалы, а также интервал τ_0 между концами импульсов τ_1 и τ_2 измеряют цифровым методом, используя каналы, содержащие временной селектор и счетчик. Счетные импульсы, поступившие на вход каждого счетчика при измерении основных расширенных интервалов, показаны на рис. 8.9, д. Измеряемые расширенные интервалы и интервал τ_0 , как следует из рис. 8.9; можно представить в виде:

$$k_1\tau_1 = N_1T_0 + \Delta t_{k1}; \quad k_2\tau_2 = N_2T_0 + \Delta t_{k2}; \quad \tau_0 = N_0T_0, \quad (8.11)$$

где N_1 , N_2 и N_0 — числа счетных импульсов, заполнивших отмеченные интервалы, а Δt_{k1} и Δt_{k2} — погрешности дискретизации измерения основных расширенных интервалов.

Из временных диаграмм на рис. 8.9 также видно, что искомый интервал можно определить как $T_x = \tau_0 + \tau_1 - \tau_2$. Подставляя в это выражение параметры τ_0 , τ_1 и τ_2 , вычисляемые по (8.11), находим, что

$$T_x = N_0T_0 + (N_1T_0 + \Delta t_{k1})/k_1 - (N_2T_0 + \Delta t_{k2})/k_2. \quad (8.12)$$

При одинаковых коэффициентах расширения сторон измеряемого интервала ($k_1 = k_2 = k$), получим

$$T_x = T_0[N_0 + (N_1 - N_2)/k] + (\Delta t_{k1} - \Delta t_{k2})/k. \quad (8.13)$$

Погрешности дискретизации Δt_{k1} и Δt_{k2} имеют равномерное распределение с пределами $0 \dots T_0$, а их разность $\Delta t_{k1} - \Delta t_{k2}$ распределена по треугольному закону с пределами $\pm T_0$. Поэтому *максимальная погрешность дискретизации при измерении интервала T_x* равна T_0/k и уменьшается с ростом коэффициента расширения k . На практике этот коэффициент выбирают равным 128 или 256 (это связано с разрядностью дискретизаторов), так как при его дальнейшем увеличении существенно возрастает погрешность расширителей интервалов.

Нониусный метод. В измерителях интервалов времени применяют и дополнительные методы расширения рабочего диапазона в сторону малых значений Δt . Одним из них является нониусный (нониус — указатель средства измерения в виде дополнительной шкалы). Этот метод позволяет снизить

погрешность дискретизации, которая становится недопустимо большой при измерении коротких (десятки наносекунд) интервалов времени. С этим приходится иметь дело, например, при измерении длительности фронта импульсных сигналов. Практическая реализация нонинусного способа обеспечивает временное разрешение порядка десятых долей наносекунды.

Современные измерительные приборы на основе микропроцессоров выполняют функции измерения интервалов времени и частоты на единой основе. Это связано с формированием и последующим измерением интервала времени, равного измеряемому интервалу (при измерении времени) или целому числу периодов измеряемого сигнала (при измерении периода и частоты). Сформированный интервал измеряется цифровым методом с интерполяцией для уменьшения погрешности дискретизации.

В таких приборах при измерении расширенных интервалов $k_1\tau_1$, $k_2\tau_2$ и интервала τ_0 (рис. 8.9) соответствующие числа счетных импульсов (N_1 , N_2 и N_0), заполняющих эти интервалы, накапливаются в отдельных регистрах.

Длительность T_x одиночного измеряемого интервала вычисляется микропроцессором согласно формуле:

$$T_x = T_0[N_0 + (N_1 - N_2 - \Delta N_{cp})/k], \quad (8.14)$$

где ΔN_{cp} — поправочное число, учитывающее взаимное рассогласование расширителей и определяемое в процессе их автоматической калибровки с помощью микропроцессора.

При измерении повторяющихся интервалов (с усреднением) дополнительно подсчитывается число N_E усредненных за время измерения интервалов. В этом случае измеряемый интервал времени вычисляется как

$$T_c = T_0[N_0 + (N_1 - N_2 - N_E \Delta N_{cp})/k]/N_E. \quad (8.15)$$

При измерении периода T_x число N_E определяет количество усредняемых периодов. При этом период вычисляют по формуле:

$$T_x = T_0[N_0 + (N_1 - N_2 - \Delta N_{cp})/k]/N_E. \quad (8.16)$$

8.7. Автоматизация процессов измерения частоты и интервалов времени

Повсеместное внедрение интегральной микроэлектроники и компьютерной техники выявило тенденцию построения измерителей временных интервалов (ИВИ) и частотомеров. В настоящее время практически отпала необходимость в параллельном развитии двух ранее вполне самостоятельных групп измерительных приборов, таких, как ЭСЧ и ИВИ. Сейчас имеются и разрабатываются многофункциональные приборы, полностью удовлетворяющие всем требованиям, которые раньше в отдельности предъявлялись к этим из-

мерителям. Так, в последних выпусках измерительных приборов, построенных с использованием микропроцессорного контроллера, функции измерения интервалов времени, периода и частоты реализуются на единой основе.

Упрощенная структурная схема цифрового измерительного прибора с микропроцессорным контроллером представлена на рис. 8.10.

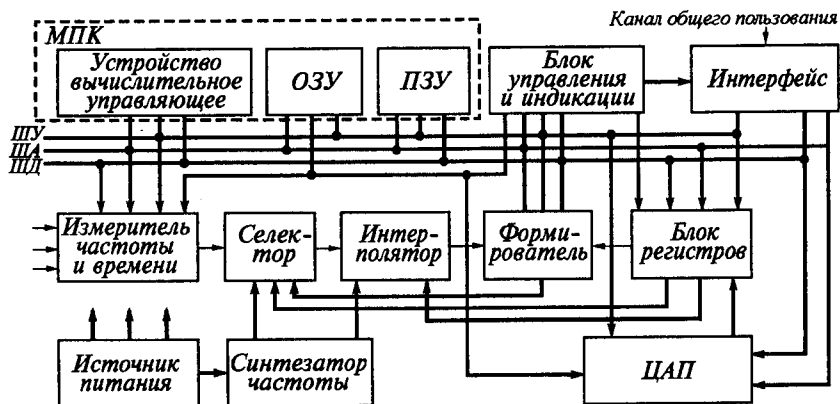


Рис. 8.10. Упрощенная структурная схема ИВИ с микропроцессором

Схема ИВИ содержит следующие блоки: измеритель частоты и интервалов времени, интерполятор, селектор, формирователь, блок регистров, ЦАП, синтезатор частоты (выполнен в виде кварцевого генератора с последующим умножением частоты), микропроцессорный контроллер (МПК), интерфейс, блоки управления и индикации, источник питания. МПК является основой прибора и включает в себя устройство вычислительное управляющее, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), программируемое (постоянное) запоминающее устройство (ПЗУ). Измеритель частоты и интервалов времени содержит усилители-формирователи входных сигналов, делитель частоты, коммутатор, запоминающее устройство и дешифратор, который содержит программу работы прибора с данным блоком.

Селектор измерительного прибора формирует из входного колебания измеряемый интервал времени, а из сигнала опорной частоты кварцевого генератора — эталонный интервал времени, равный измеряемому с точностью до длительности периода сигнала опорной частоты.

Схема интерполятора включает два одинаковых канала и служит для расширения импульсов, отражающих погрешности дискретизации, и последующего их измерения методом счета числа колебаний опорной частоты. Формирователь готовности содержит дешифратор управления селектором и счетчики числа импульсов, а также вырабатывает специальный сигнал, задающий время работы селектора.

Блок регистров содержит основную часть счетчиков, а также дешифратор управления, вырабатывающий сигнал сброса регистров, установки в исходное состояние селектора, приема и выдачи информации. Схема совпадения выдает сигнал в момент переполнения счетчика. Сигнал с выхода схемы совпадения подготавливает окончание времени счета прибора. В данной схеме узел ЦАП предназначен для измерения уровня запуска прибора в режиме ручного управления и для установки требуемого уровня запуска в режиме дистанционного управления прибором.

Блок управления и индикации управляет блоком индикатора и преобразует командные сигналы, поступающие с МПК, в управляющие сигналы прибора. Он также содержит цифровой индикатор и клавиатуру для ввода данных. Интерфейс обеспечивает работу прибора в измерительных системах с каналом общего пользования. Блок питания вырабатывает питающие напряжения. Синтезатор частоты с кварцевым генератором создает стабильные гармонические колебания различной частоты (частотой 5 МГц и т.д.).

Технические характеристики МПК определяются в основном параметрами стандартных современных отечественных или иностранных микропроцессоров и КМОП интегральных микросхем, на которых построено большинство устройств сопряжения. МПК подключается к устройствам памяти непосредственно через приборную магистраль, к другим устройствам измерительного прибора — частично через приборную магистраль и блок управления. В приборе предусмотрен режим самоконтроля, осуществляемый измерением частоты или периода собственного опорного сигнала кварцевого генератора частотой 100 МГц. Для внутренних связей и подключения к внешним устройствам, например к компьютеру, в измерительном приборе имеются три вида цифровых магистралей: шина управления (ШУ), адресная шина (ША) и шина данных (ШД).

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы измерения частоты.
2. Какова основная область применения резонансного метода измерения частоты?
3. Какие основные ограничения присущи методу измерения частоты при помощи заряда-разряда конденсатора?
4. В чем заключается принцип работы гетеродинного частотомера?
5. Объясните временные диаграммы, соответствующие режиму измерения частоты цифровым прибором.
6. Объясните временные диаграммы, соответствующие режиму измерения временных интервалов цифровым прибором.
7. Как влияет погрешность дискретности на результат при измерении высоких и низких частот цифровым прибором?
8. Как автоматизируют процессы измерения частоты и интервалов времени?
9. Представьте упрощенную структурную схему ИВИ с микропроцессором.

Глава 9. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

К числу одного из основных параметров электрических колебаний, определяющих состояние колебательного процесса в любой заданный момент времени, относится фаза. Наряду с фазой одного колебания интерес представляет соотношение фаз двух колебаний. Необходимость в измерениях этих параметров возникает при исследовании усилителей, фильтров, линейных цепей, градуировке фазовращателей, снятии фазочастотных характеристик различных радиотехнических устройств и т. д.

9.1. Общие сведения

Понятие «фаза» характеризует гармоническое (синусоидальное) колебание в любой конкретный момент времени. Для гармонического колебания $u_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$ с амплитудой U_{m1} и круговой частотой ω текущая (мгновенная) фаза в любой момент времени t равна $\varphi(t) = \omega t + \varphi_1$, где φ_1 — начальная фаза.

Фазовым сдвигом $\Delta\varphi$ двух гармонических сигналов одинаковой частоты $u_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$ и $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$ называется модуль разности их начальных фаз:

$$\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|. \quad (9.1)$$

Собственно же величина $\varphi_1 - \varphi_2$ называется *разностью фаз* сигналов. Фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ не зависит от времени, если остаются неизменными начальные фазы φ_1 и φ_2 .

Так как фаза и время связаны линейной зависимостью, то фазовый сдвиг используют для количественной оценки времени запаздывания прохождения сигнала через электрическую цепь. При этом в зависимости от конкретной измерительной задачи и диапазона частот, в котором производятся измерения, требования к точности измерения фазового сдвига могут быть различными — от достаточно грубых измерений (с погрешностью измерения $1 \dots 5^\circ$) до весьма точных ($0,01^\circ$).

На практике обычно решают задачу измерения разности фаз двух гармонических (синусоидальных) колебаний с равными частотами. При этом фазовый сдвиг удобно представить в виде зависимости от *сдвига сигналов во времени* Δt , соответствующего их идентичным фазам. Так, например, для

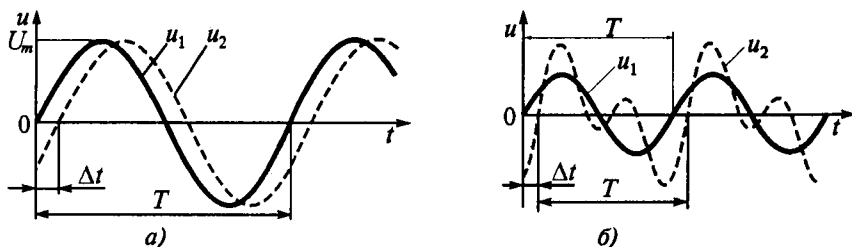


Рис. 9.1. Графики двух сигналов с одинаковыми периодами:
 а — синусоидальных; б — синусоидального и несинусоидального

гармонических сигналов $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и $u_2(t) = U_m \sin \omega(t - \Delta t)$, имеющих одинаковый период $T = \frac{2\pi}{\omega}$, фазовый сдвиг в радианах (рис. 9.1, а):

$$\Delta \varphi = \omega \Delta t = \frac{2\pi \Delta t}{T}. \quad (9.2)$$

Два сигнала называются *синфазными*, *противофазными* и *находящимися в квадратуре*, если фазовый сдвиг между ними равен 0, π и $\pi/2$ соответственно. Применительно к периодическим синусоидальному и несинусоидальному сигналам (рис. 9.1, б) и к двум несинусоидальным сигналам с одинаковым периодом T используется понятие об их *сдвиге* (задержке) во времени Δt .

Для измерения фазового сдвига используют приборы, называемые фазометрами, а в качестве мер сдвига — *фазовращатели*, т. е. линейные четырехполосники, у которых выходной сигнал задержан по фазе относительно входного. Существуют регулируемые и нерегулируемые фазовращатели.

Чтобы измерить фазовый сдвиг, применяют различные методы и приемы измерений: осциллографические, компенсационный, преобразования фазового сдвига во временной интервал, цифровой (дискретного счета), по геометрической сумме и разности напряжений, а также с преобразованием частоты.

Средства измерений фазового сдвига, реализующие перечисленные способы (кроме осциллографических) представлены аналоговыми и цифровыми электронными фазометрами, обеспечивающими измерения в диапазоне от инфразвуковых до высоких частот.

9.2. Осциллографические методы

Для измерения фазового сдвига с помощью осциллографа применяются методы линейной, синусоидальной и круговой разверток, а также метод полукружности.

Метод линейной развертки

Данный метод реализуется при наблюдении на экране одновременно двух сигналов (рис. 9.1, а). Способ линейной развертки состоит в подаче напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$ в каналы вертикального отклонения двухлучевого или двухканального осциллографа (на входы Y_1 и Y_2) и последующем измерении интервалов Δt и T . Мож-

но также применить однолучевой осциллограф (рис. 9.2), если на его вход Y подавать исследуемые сигналы поочередно через электронный коммутатор. Электронный коммутатор периодически переключается с помо-

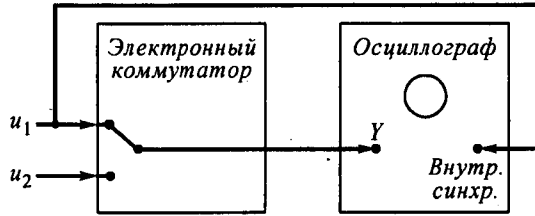


Рис. 9.2. Метод линейной развертки

щью импульсов типа «меандр», поступающих с генератора и следующих с частотой $F \geq (25 \dots 100)$ Гц. В том и другом вариантах горизонтальные развертки осциллографов (внутр. синхр.) должны быть синхронизированы одним из сигналов. Полезно уравнивать амплитуды обоих напряжений.

Измерив временные отрезки Δt и T (см. рис. 9.1), вычисляют фазовый сдвиг сигналов в радианах по формуле (9.2) или в градусах по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ \Delta t}{T}. \quad (9.3)$$

При данном методе погрешность измерения фазового сдвига $\Delta\varphi$ составляет $\pm(5 \dots 7)^\circ$ и вызвана нелинейностью развертки, неточностью замера интервалов Δt и T , а также ошибками определения положения оси времени.

Метод синусоидальной развертки или эллипса

Метод реализуется с помощью однолучевого осциллографа при подаче одного сигнала на вход Y , а второго — на вход X отклонения луча. При этом генератор развертки осциллографа должен быть выключен.

Пусть на входы X и Y осциллографа были поданы соответственно сигналы $u_1(t) = u_1 = U_{m1} \sin \omega t$ и $u_2(t) = u_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$, для которых фазовый сдвиг $\Delta\varphi = \varphi$ (далее в выражениях для $u_1(t)$ и $u_2(t)$ аргумент t везде опущен). Мгновенные отклонения луча на экране по горизонтали и вертикали равны:

$$x = h_x U_{m1} \sin \omega t = a \sin \omega t; \quad (9.4)$$

$$y = h_y U_{m2} \sin(\omega t + \varphi) = b \sin(\omega t + \varphi), \quad (9.5)$$

где коэффициенты h_x, h_y — соответственно чувствительности осциллографа к отклонению луча по горизонтали и вертикали; $a = h_x U_{m1}$, $b = h_y U_{m2}$ — амплитуды отклонения луча (рис. 9.3).

Для определения формы фигуры, вычерчиваемой лучом на экране осциллографа, найдем ее аналитическую запись. Для этого достаточно исключить из формул (9.4) и (9.5) переменную t и затем представить отклонение y в зависимости от величины x :

$$\sin \omega t = \frac{x}{a}, \quad \cos \omega t = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}; \quad (9.6)$$

$$y = b \sin(\omega t + \varphi) = b(\sin \omega t \cdot \cos \varphi + \cos \omega t \cdot \sin \varphi). \quad (9.7)$$

После подстановки (9.6) в (9.7) получим выражение:

$$y = \frac{b}{a} \left(x \cos \varphi \pm \sqrt{a^2 - x^2} \sin \varphi \right), \quad (9.8)$$

представляющее собой уравнение эллипса, показанного на рис. 9.3.

Определим величину фазового сдвига сигналов u_1 и u_2 . Частям эллипса, представленным непрерывной и штриховой линиями (рис. 9.3), соответствует уравнение (9.8), в котором перед корнем стоят знаки плюс и минус соответственно. Величины отрезков y_0 и x_0 находятся по уравнению (9.8), если положить для непрерывной линии $x = 0$, а для штриховой $y = 0$: $y_0 = b \sin \varphi$, $x_0 = a \sin \varphi$. Отсюда искомый фазовый сдвиг в радианах:

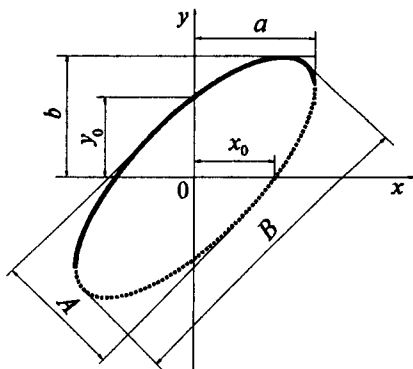


Рис. 9.3. К измерению разности фаз методом эллипса

$$\Delta \varphi = \varphi = \arcsin \left(\frac{y_0}{b} \right) = \arcsin \left(\frac{x_0}{a} \right). \quad (9.9)$$

Перед началом измерения $\Delta \varphi$ обычно уравнивают на экране амплитуды b и a (рис. 9.3). Для этого поочередно отключают сигналы u_1 и u_2 от входов X и Y и с помощью регулировок чувствительности h_x или h_y добиваются равенства $b = a$. Измерив на экране отрезки $2y_0$ и $2b$ (или $2x_0$ и $2a$), подставляют их отношение в формулу (9.9) и вычисляют $\Delta \varphi$.

Фазовый сдвиг при $a = b$ (рис.9.3) можно определить и другим способом. Для этого следует измерить большую B и малую A оси эллипса и вычислить фазовый сдвиг по формуле $\Delta\varphi = 2\arctg(A/B)$.

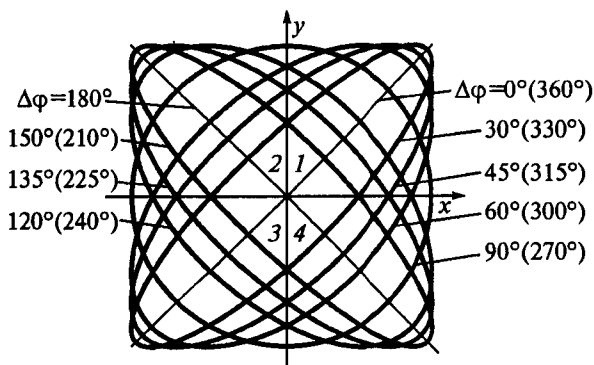


Рис. 9.4. Метод эллипса: осциллограммы при разных фазовых сдвигах

Метод эллипса не позволяет однозначно определить фазовый сдвиг в диапазоне $(0...360)^\circ$. Это видно из осциллограмм на рис. 9.4, соответствующих различным значениям $\Delta\varphi$. Неоднозначность измерения имеет место для фазовых сдвигов:

$$0 < \Delta\varphi < 90^\circ \text{ и } 270^\circ < \Delta\varphi < 360^\circ;$$

$$90^\circ < \Delta\varphi < 180^\circ \text{ и } 180^\circ < \Delta\varphi < 270^\circ; \quad \Delta\varphi = 90^\circ \text{ и } \Delta\varphi = 270^\circ.$$

С целью получения правильного результата измерения $\Delta\varphi$, необходимо также подавать сигнал u_2 на вход Y осциллографа через фазовращатель, создающий дополнительный фазовый сдвиг на 90° . По изменению осциллограммы можно сделать вывод о значении $\Delta\varphi$. Порядок устранения неоднозначности и формулы расчета $\Delta\varphi$ приведены в табл.9.1.

Таблица 9.1. Формулы расчета $\Delta\varphi$

Исходное положение большой оси эллипса (БООЭ)	В 1-м и 3-м квадрантах		Во 2-м и 4-м квадрантах	
	Во 2-м и 4-м квадрантах	В 1-м и 3-м квадрантах	Во 2-м и 4-м квадрантах	В 1-м и 3-м квадрантах
Положение БООЭ при уве- личении $\Delta\varphi$ на 90°	Во 2-м и 4-м квадрантах	В 1-м и 3-м квадрантах	Во 2-м и 4-м квадрантах	В 1-м и 3-м квадрантах
Диапазон, в котором расположен $\Delta\varphi$	$0 < \Delta\varphi < 90^\circ$	$270^\circ < \Delta\varphi < 360^\circ$	$90^\circ < \Delta\varphi < 180^\circ$	$180^\circ < \Delta\varphi < 270^\circ$
Выражение для расчета $\Delta\varphi$ в градусах	$\Delta\varphi'$	$360^\circ - \Delta\varphi'$	$180^\circ - \Delta\varphi'$	$180^\circ + \Delta\varphi'$
Примечание: $\Delta\varphi' = 180^\circ \arcsin[(y_o/b)/\pi] = 180^\circ \arcsin[(x_o/a)/\pi]$				

В дополнение к табл. 9.1 отметим, что неоднозначность для фазовых сдвигов $\Delta\varphi = 90^\circ$ и $\Delta\varphi = 270^\circ$ устраняется аналогично. Если при дополнительном фазовом сдвиге сигнала u_2 на 90° осциллограмма имеет вид отрезка прямой, расположенного во 2-м и 4-м квадрантах, то $\Delta\varphi = 90^\circ$, а если в 1-м и 3-м — то $\Delta\varphi = 270^\circ$.

Погрешность измерения фазового сдвига между двумя синусоидальными сигналами методом эллипса — она составляет $\pm (2\dots 5)^\circ$ — зависит от точности измерения длин отрезков, входящих в выражение (9.9), размера осциллограммы и точности фокусировки луча на экране осциллографа. Эти причины оказывают тем большее влияние, чем ближе измеряемый сдвиг фаз к нулю или к 90° . Возможна также систематическая погрешность измерения из-за наличия разного фазового сдвига, создаваемого усилителями каналов вертикального и горизонтального отклонения лучей трубки. Для ее устранения можно (перед началом измерений) один из исследуемых сигналов подать на вход Y осциллографа непосредственно, а на вход X — через регулируемый фазовращатель. Изменяя настройку фазовращателя, необходимо добиться появления на экране осциллографа наклонной прямой линии, расположенной под углом 45° . Затем, сохраняя эту настройку, подать на вход фазовращателя второй сигнал и провести требуемое измерение фазового сдвига сигналов.

Метод круговой развертки

Этот метод обеспечивает измерение фазового сдвига практически в пределах от 0° до 360° . Сущность метода поясняется схемами и диаграммами, показанными на рис. 9.5, для случая измерения фазового сдвига между сигналами $u_1 = U_{m1}\sin\omega t$ и $u_2 = U_{m2}\sin\omega(t - \Delta t)$.

Генератор развертки осциллографа предварительно выключается и на входы Y и X подаются сигнал u_1 и сигнал u_3 (рис. 9.5, а), задержанный относительно u_1 по фазе на 90° с помощью дополнительного фазовращателя (ФВ). При одинаковом отклонении электронного луча по горизонтали и вертикали на экране осциллографа будет наблюдаться осциллограмма, имеющая вид окружности (рис. 9.5, б).

Анализируемые напряжения u_1 и u_2 поступают также на входы идентичных формирователей $\Phi 1$ и $\Phi 2$, преобразующих синусоидальные колебания в последовательность коротких однополярных импульсов u_4 и u_5 (рис. 9.5, в). Передние фронты этих импульсов практически совпадают с моментом перехода синусоид через нулевое значение при их возрастании. Импульсные сигналы u_4 и u_5 объединяются с помощью логической схемы ИЛИ. Ее выходной сигнал u_6 в виде двухимпульсной последовательности подается на вход Z управления яркостью луча осциллографа. В результате на окружности (рис. 9.5, б) в точках 1 и 2 появляются отметки повышенной яркости.

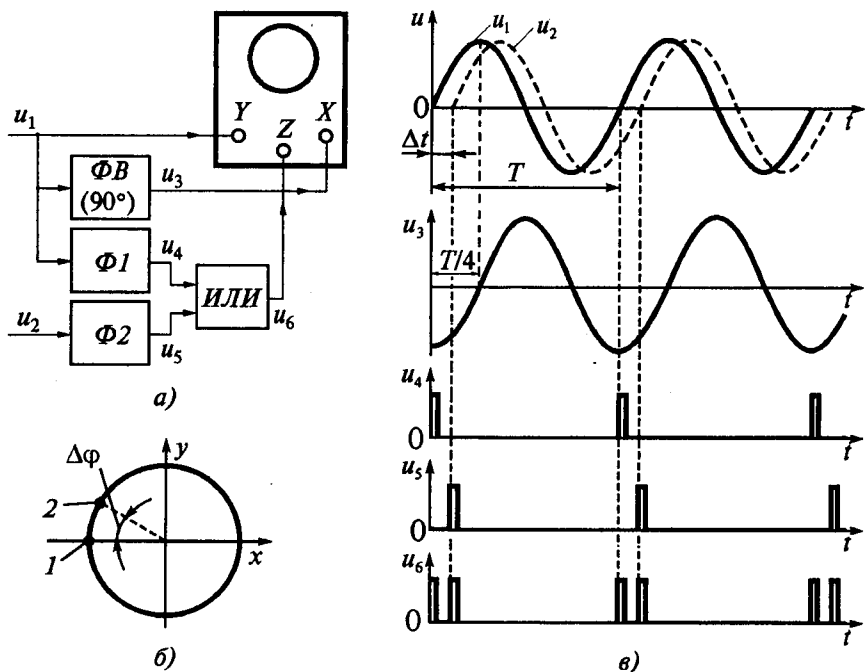


Рис. 9.5. Метод круговой развертки:
а — схема измерения; б — осциллограмма; в — эпюры сигналов

Измерение фазового сдвига $\Delta\phi$ между сигналами u_1 и u_2 выполняют так, как показано на рис. 9.5, б. При измерении фазового сдвига данным способом удобно использовать прозрачный транспортир, помещенный перед экраном осциллографа; центр транспортира совмещают с центром окружности. Измеряемый фазовый угол отсчитывают по делениям транспортира. Данный метод измерения основан на следующем. Полную окружность, которой соответствует угол 360° , луч описывает за время, равное периоду T сигналов u_1 или u_2 , а дугу между точками 1 и 2, которой соответствует некоторый угол $\Delta\phi$, — за время задержки этих сигналов $\Delta t = \Delta\phi T / 360^\circ$.

При измерениях фазового угла способом полуокружности (он здесь не рассматривается, так как применяется редко) можно достичь более высокой точности (погрешность измерения $1...3^\circ$). Кроме того, этот метод позволяет получить прямой отсчет фазового угла с указанием знака. На погрешность измерения фазового угла влияют точности формирования окружности и определения ее центра, а также степень идентичности порога срабатывания формирователей и точность измерения угла $\Delta\phi$ с помощью транспортира.

9.3. Компенсационный метод

Рассмотрим один из способов, реализующих компенсационный (нулевой) метод измерений и являющийся разновидностью метода сравнения. Его сущность состоит в сравнении измеряемого фазового сдвига с известным фазовым сдвигом, создаваемым мерой — образцовым фазовращателем.

Структурная схема измерительной установки приведена на рис. 9.6. Она содержит измерительный фазовращатель (ФВ) и индикатор равенства фаз, в качестве которого использован осциллограф с отключенным генератором развертки. Сигнал u_1 подается на вход Y осциллографа через фазовращатель, а сигнал u_2 на вход X — непосредственно.

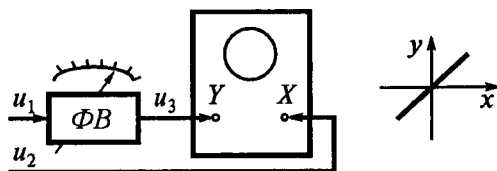


Рис. 9.6. К определению фазового сдвига компенсационным методом

Фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между двумя сигналами u_1 и u_2 определяют путем изменения фазы дополнительного сигнала u_3 с помощью образцового фазовращателя до момента появления на экране наклонной прямой линии (см. рис. 9.6), т. е. до момента равенства фаз сигналов u_2 и u_3 . При этом искомый фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ считают по шкале образцового фазовращателя. Для более точных измерений следует проверить и скомпенсировать возможное неравенство фазовых сдвигов, вырабатываемых усилителями вертикального и горизонтального отклонения луча осциллографа. Это выполняется в порядке, изложенном при рассмотрении метода эллипса.

Точность измерения компенсационным методом высокая. Погрешность измерения определяется в основном качеством градуировки шкалы фазовращателя и достигает $(0,1 \dots 0,2)^\circ$.

Компенсационный метод используют и в диапазоне СВЧ для измерения фазового сдвига, создаваемого различными радиотехническими устройствами (фильтром, отрезком волновода или полосковой линии и т.п.). Процесс измерений можно пояснить структурной схемой, показанной на рис. 9.7, где: Γ — СВЧ-генератор, АТ — развязывающий аттенуатор, ФВ — измерительный СВЧ-фазовращатель, Z — испытуемое устройство, КЗ — короткозамыкающая заглушка.

Измерение выполняется в два этапа. Вначале собирается установка, показанная на рис. 9.7, а. При включении генератора Γ в тракте устанавливается стоячая волна. В произвольном сечении фазовращателя вводится зонд, соединенный с диодом и индикатором. Перестраивая фазовращатель, добиваются совмещения узла напряжения стоячей волны с плоскостью сечения, в которую введен зонд. Момент совмещения устанавливается по нулевому

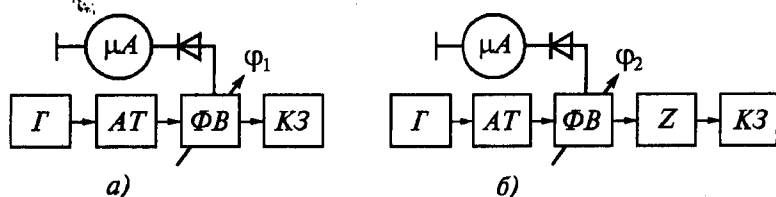


Рис. 9.7. Измерение фазового сдвига на СВЧ компенсационным методом:
а — схема исходной установки; б — схема измерения

показанию индикатора. При этом со шкалы ΦB считывается показание фазового угла φ_1 .

Затем собирается установка, приведенная на рис. 9.7, б, в которой между ΦB и короткозамыкающей заглушкой вводится испытуемое устройство Z . При этом в тракте распространения СВЧ колебаний происходит смещение узла напряжения. Перестраивая ΦB , снова добиваются (по нулевому показанию индикатора) совмещения узла с плоскостью установки зонда. Со шкалы ΦB считывают новое показание φ_2 . Искомый фазовый сдвиг, вносимый устройством Z , определяется по формуле $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)/2$.

Процесс измерения фазового сдвига компенсационным методом легко автоматизировать; объектом автоматизации является измерительный фазовращатель. Соответствующие фазометры называют *автокомпенсационными*.

9.4. Метод преобразования фазового сдвига во временной интервал

Приборы для фазовых измерений могут содержать преобразователи — устройства, формирующие электрические сигналы, параметры которых функционально связаны с измеряемым фазовым сдвигом.

Структурная схема устройства, преобразующего фазовый сдвиг во временной интервал (в виде импульсов тока), и эпюры, поясняющие его работу, даны на рис. 9.8. В состав устройства входят преобразователь ($\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$) искомого фазового сдвига $\Delta\varphi$ в интервал времени Δt и измерительный прибор. Преобразователь ($\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$) имеет два одинаковых формирователя $\Phi 1$ и $\Phi 2$ и триггер T . Принцип действия формирователей пояснен в разделе 8.5 (см. рис. 8.7 и 8.8).

Синусоидальные сигналы u_1 и u_2 , имеющие некоторый фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, подаются на идентичные формирователи $\Phi 1$ и $\Phi 2$, преобразующие их в последовательности коротких импульсов u_3 и u_4 (рис. 9.8, б). Импульсы u_3 запускают, а импульсы u_4 сбрасывают триггер T в исходное состояние. В результате на выходе триггера формируется периодическая последовательность импульсов напряжения, период повторения и длительность которых равны периоду T и сдвигу во времени Δt исследуемых сигналов u_1 и u_2 . Данные импульсы, поступая на

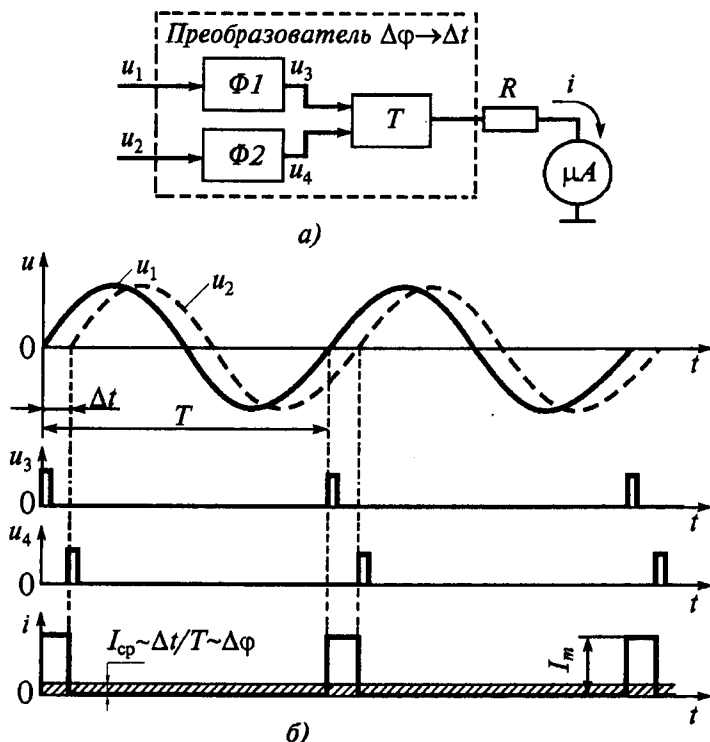


Рис. 9.8. Метод преобразования фазового сдвига во временной интервал:
а — схема устройства; б — эюры сигналов

резистор R , соединенный с измерительным прибором (микроамперметром) μA , преобразуются в последовательность импульсов тока i с аналогичными периодом и длительностью и некоторой амплитудой I_m (рис. 9.8, б).

В качестве измерительного прибора применяют микроамперметр магнитоэлектрической системы, реагирующий на среднее значение тока i за период его следования T . Пусть S_I и I_{cp} — чувствительность прибора и среднее значение протекающего через него тока. Тогда показание прибора:

$$\alpha = S_I I_{cp} = S_I \frac{1}{T} \int_0^{\Delta t} I_m dt = S_I I_m \frac{\Delta t}{T}. \quad (9.10)$$

С учетом выражения (9.3), получим

$$\alpha = S_I I_m \frac{\Delta\phi}{360^\circ}, \quad (9.11)$$

где $\Delta\varphi$ — измеряемый фазовый сдвиг. Так как чувствительность S_I прибора и амплитуда обычно I_m постоянны, то шкалу микроамперметра можно проградуировать непосредственно в градусах. Измеренное значение фазового сдвига является средним за время измерения.

Это устройство — прямопоказывающий аналоговый фазометр с равномерной шкалой. Диапазон рабочих частот ограничен снизу инерционностью магнитоэлектрического прибора, а сверху — конечностью длительностей фронтов импульсов формирователей $\Phi 1$ и $\Phi 2$, влияющих на работу триггера T . Погрешность измерения зависит от погрешности преобразователя и класса точности микроамперметра. Аналоговые фазометры измеряют фазовый сдвиг сигналов в диапазоне частот $(20 \dots 10^6)$ Гц с погрешностью $\pm (1 \dots 2)^\circ$.

9.5. Цифровые методы измерения фазового сдвига

Большинство цифровых фазометров близки по принципу действия к цифровым измерителям интервалов времени и работают по методу дискретного счета. Метод дискретного счета (более точно — *цифровой метод измерения фазового сдвига*), используемый в цифровых фазометрах, включает две операции:

- преобразование фазового сдвига в интервал времени;
- измерение интервала времени методом дискретного счета.

Цифровые фазометры

Рассмотрим реализацию метода дискретного счета в простейшем цифровом фазометре (рис. 9.9, а), структурная схема которого содержит преобразователь искомого фазового сдвига $\Delta\varphi$ в интервал времени Δt ($\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$), временной селектор (ВС), формирователь счетных импульсов (f/nf), счетчик (СЧ) и цифровое отсчетное устройство (ЦОУ). Структурная схема и принцип действия преобразователя ($\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$) полностью совпадает со схемой и принципом действия аналогичного преобразователя, описанного в разделе 9.4. Временной селектор представляет собой ключевую логическую схему. Формирователь счетных импульсов построен на базе умножителя частоты входного сигнала и схемы формирования выходных импульсов.

Цифровой фазометр работает следующим образом. Преобразователь $\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$ из подаваемых на его входы синусоидальных сигналов u_1 и u_2 с фазовым сдвигом $\Delta\varphi$ формирует последовательность прямоугольных импульсов u_3 (рис. 9.9, б), имеющих длительность Δt и период повторения T , равные соответственно сдвигу во времени и периоду сигналов u_1 и u_2 .

Импульсы u_3 , а также счетные импульсы u_4 , вырабатываемые формирователем счетных импульсов, подаются на входы временного селектора. Селектор открывается на время, равное длительности Δt импульсов u_3 , и в течение этого

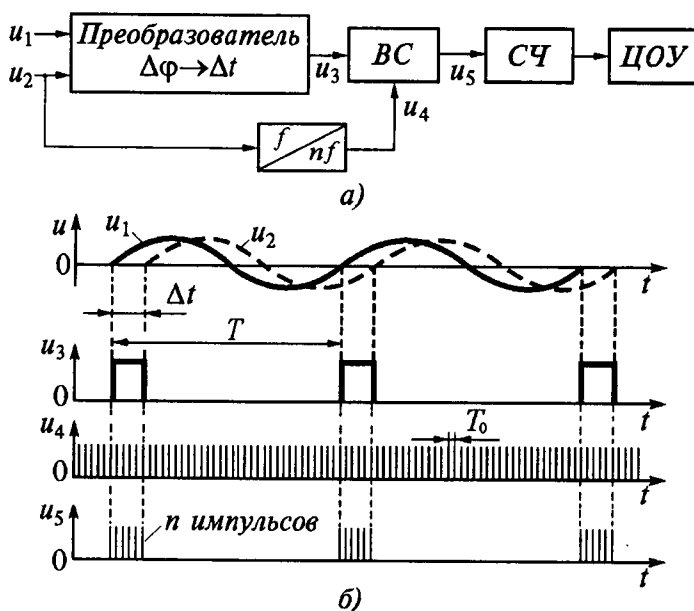


Рис. 9.9. Цифровой метод измерения фазового сдвига:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

интервала пропускает на вход счетчика импульсы u_4 . На выходе селектора формируются пакеты импульсов u_5 , следующие с периодом T .

Измерение проводится за один период T сигналов u_1 и u_2 (схема управления, обеспечивающая такой режим измерения, на рис. 9.9,а не приведена). При этом на счетчик с выхода селектора поступает количество импульсов, содержащееся в одном пакете и равное

$$n = \Delta t / T_0, \quad (9.12)$$

где $T_0 = T / (36 \cdot 10^m)$ — период следования счетных импульсов формирователя (f/nf), $m = (1, 2, 3 \dots)$.

Подставляя в (9.12) соотношение для Δt из (9.3), находим выражение для измеряемого фазового сдвига сигналов u_1 и u_2 :

$$\Delta \varphi = \frac{n}{10^{m-1}}. \quad (9.13)$$

Из (9.13) следует, что фазовый сдвиг $\Delta \varphi$ пропорционален числу счетных импульсов n , поступивших на счетчик. Кодовый сигнал со счетчика, пропорциональный фазовому сдвигу $\Delta \varphi$, подается на ЦОУ, показания которого выдаются градусах при $m = 1$, с учетом десятых долей градуса при $m = 2$ и т.д.

Погрешность данного цифрового фазометра определяется погрешностями дискретности и аппаратуры. Погрешность дискретности связана с тем, что интервал времени Δt можно измерить с точностью до одного периода счетных импульсов. Аппаратурная погрешность определяется отклонением длительности от Δt , нестабильностью преобразователя $\Delta\phi \rightarrow \Delta t$ и прочее.

Для уменьшения погрешностей измерения используют цифровые фазометры среднего значения, результатом измерения которых является среднее значение измеряемого фазового сдвига за большое число периодов T анализируемого гармонического колебания.

Структурная схема цифрового фазометра среднего значения представлена вместе с поясняющими эпорами на рис. 9.10.

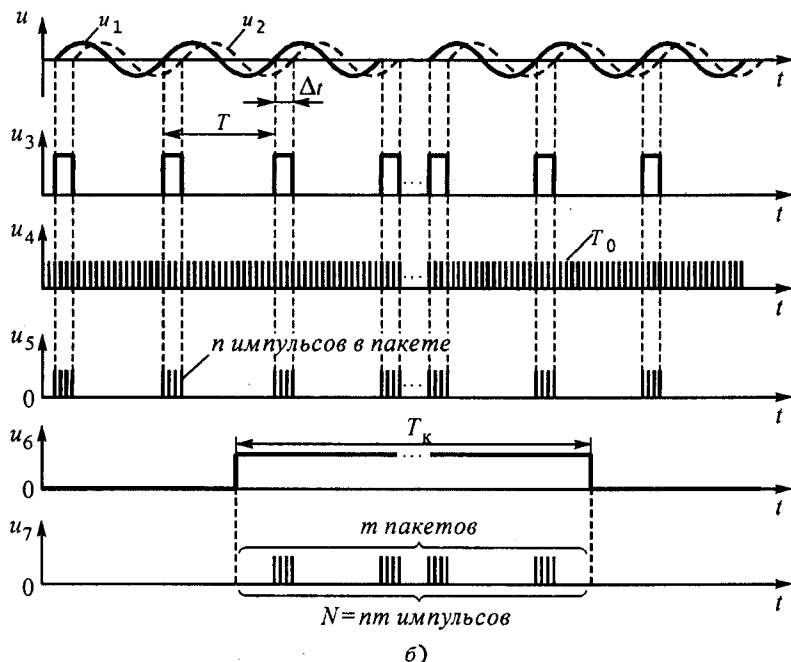
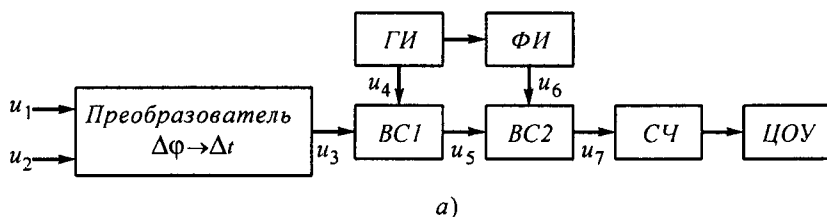


Рис. 9.10. Измерение сдвига фаз цифровым фазометром среднего значения:
а — схема; б — эпюры к схеме

Она отличается от схемы (см. рис. 9.9, а) рассмотренного выше фазометра наличием второго временного селектора ВС2, генератора импульсов (ГИ) и формирователя импульсов (ФИ).

Принцип работы фазометра удобно анализировать, выделяя в нем функционально законченные устройства. К их числу относится преобразователь $\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$ искомого фазового сдвига $\Delta\varphi$ двух синусоидальных сигналов u_1 и u_2 в интервал времени Δt , формирующий импульсный сигнал u_3 (рис. 9.10, б), а также преобразователь $\Delta t \rightarrow n$ интервала Δt в соответствующее число (пакет) импульсов n . Преобразователь $\Delta t \rightarrow n$, формирующий пакеты импульсов u_5 , состоит из генератора импульсов (ГИ) и временного селектора (ВС1). Номинальное число импульсов n в одном пакете определяется выражением (9.12).

Для усреднения результата измерения пакеты импульсов u_5 подают на устройство, выдающее m таких пакетов за калиброванный отрезок времени $T_k \gg T$, где T — период повторения исследуемых сигналов u_1 и u_2 . В состав устройства входит формирователь импульса (ФИ) длительностью T_k и временной селектор ВС2. Схема ФИ построена на базе делителя частоты с коэффициентом деления K_d . На его вход поступают импульсы u_4 с периодом повторения T_0 (на рис. 9.10, б период T_0 показан стрелкой) от генератора импульсов. При этом на выходе ФИ формируется импульс u_6 длительностью $T_k = K_d T_0$, открывающий временной селектор ВС2. В результате на выход последнего проходит ряд пакетов импульсов u_5 , число которых

$$m = T_k / T = K_d T_0 / T. \quad (9.14)$$

Сигнал u_7 на выходе временного селектора ВС2 (рис. 9.10, б) поступает на счетчик (СЧ), связанный с ЦОУ. Общее число импульсов, поступивших на этот счетчик, с учетом выражений (9.12), (9.14) и основной формулы (9.3):

$$N = n m = \frac{\Delta t}{T_0} \frac{K_d T_0}{T} = K_d \frac{\Delta t}{T} = K_d \frac{\Delta\varphi}{360^\circ}. \quad (9.15)$$

Из (9.15) находим измеряемый фазовый сдвиг между гармоническими напряжениями u_1 и u_2 :

$$\Delta\varphi = N \frac{360^\circ}{K_d} = \frac{N}{k}. \quad (9.16)$$

В выражении (9.16) коэффициент k является постоянным для данного прибора и выбирается равным 10^a , где a — целое число. При этом на шкале ЦОУ показания фазового сдвига отражаются в градусах. Чем больше a , тем выше разрешающая способность фазометра, определяемая коэффициентом k .

В фазометре (рис. 9.10, а) генератор ГИ и исследуемые сигналы u_1 и u_2 не имеют взаимной синхронизации. Поэтому возможно изменение номинально-

го числа импульсов n в одном пакете на ± 1 импульс (погрешность дискретности). Однако результирующая погрешность за время измерения T_k уменьшается, так как на счетчик поступают импульсы от m пакетов, в которых увеличение или уменьшение числа импульсов n на один импульс равновероятно. На погрешность показаний фазометра влияет также неточность фиксации преобразователем $\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$ моментов перехода сигналов u_1 и u_2 через нулевой уровень, отличие этих сигналов от синусоидальной формы, а также влияние шумовых помех на преобразование фазового сдвига в интервал времени. Однако погрешности от этих причин, как и погрешность дискретности, уменьшаются при усреднении результата измерения за интервал времени T_k , значительно больший периода исследуемых сигналов.

Погрешность измерения цифрового фазометра указывается в его паспорте. Если у фазометра преобладает аддитивная составляющая погрешности, то в паспорте приводится предел его допускаемой основной абсолютной погрешности: $\Delta_{\text{пр}} = \pm \varphi_0$ (например, $\Delta_{\text{пр}} = \pm 0,5^\circ$). Если же аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности соизмеримы по значению, то указывается зависимость предела абсолютной допускаемой погрешности от показания фазометра φ_n : $\Delta_{\text{пр}} = \pm (\varphi_0 + b\varphi_n)$, где b — постоянное число; например, $\Delta_{\text{пр}} = \pm (0,5 + 0,01\varphi_n)^\circ$.

Микропроцессорный фазометр

Значительное расширение функциональных возможностей, повышение надежности и некоторых других характеристик фазометров обеспечиваются при их построении на основе микропроцессора, работающего совместно с измерительными преобразователями. Такие фазометры позволяют измерять фазовый сдвиг между двумя периодическими сигналами за любой выбранный период, наблюдать флуктуации подобных сдвигов и оценивать их статистические характеристики: математическое ожидание, дисперсию, среднее квадратическое отклонение. Возможно также, как и в рассмотренных выше цифровых фазометрах, выполненных по схемам с жесткой логикой работы, измерение среднего значения фазового сдвига.

Структурная схема микропроцессорного фазометра приведена на рис. 9.11, а. Принцип измерения фазового сдвига между двумя синусоидальными сигналами u_1 и u_2 за один выбранный период T их следования поясняется временными диаграммами на рис. 9.11, б.

В фазометре в схеме импульсного преобразователя (ИПР) сигналы u_1 и u_2 преобразуются в короткие импульсы u'_1 и u'_2 , соответственно. Формирователь ΦI с помощью первой пары данных импульсов вырабатывает импульс u_3 длительностью Δt , равной сдвигу во времени сигналов u_1 и u_2 . Импульсом u_3 открывается временный селектор (BC1), который в течение времени Δt пропускает на вход счетчика (СЧ1) счетные импульсы, следующие с периодом T_0 и выраба-

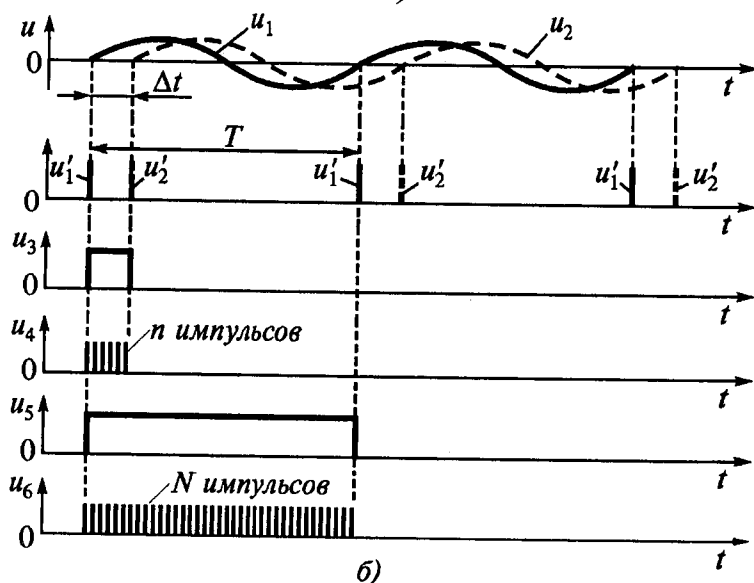
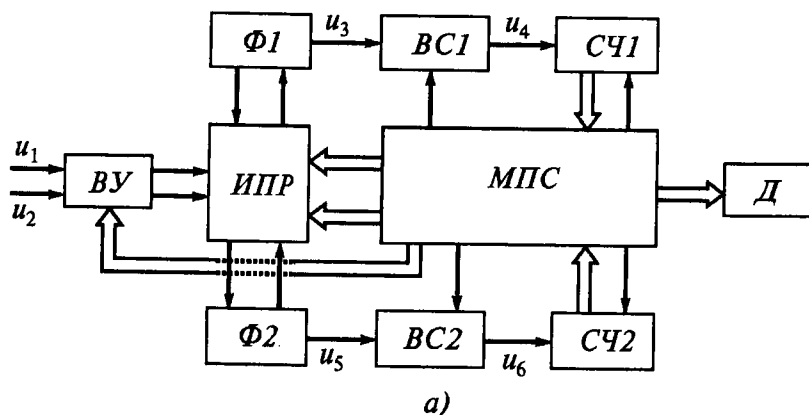


Рис. 9.11. Микропроцессорный цифровой фазометр:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

тываемые микропроцессорной системой (МПС). Поступающий на вход СЧ1 пакет импульсов обозначен на рис. 9.11, б через u_4 .

Число импульсов в пакете

$$n = \Delta t / T_0. \quad (9.17)$$

Одновременно формирователь Ф2 вырабатывает импульс u_5 , длительность которого равна периоду T исследуемых сигналов u_1 и u_2 . Импульс u_5

открывает на время T временной селектор ВС2, пропускающий от МПС на вход счетчика СЧ2 пакет импульсов u_c . Период импульсов в пакете T_0 , а их число

$$N = T/T_0. \quad (9.18)$$

Для оценки искомого значения фазового сдвига $\Delta\varphi$ за выбранный период T требуется найти отношение величин (9.17) и (9.18), равное $n/N = \Delta t/T$, а затем, учитывая основную формулу (9.3), домножить это отношение на 360° :

$$\Delta\varphi = 360^\circ n/N. \quad (9.19)$$

Вычисление выражения (9.19) выполняется МПС, на которую передаются вырабатываемые счетчиками СЧ1 и СЧ2 коды чисел n и N . При соответствующей программе МПС на дисплее Д отображается значение фазового сдвига $\Delta\varphi$ для любого выбранного периода T . За счет сравнения таких сдвигов в разных периодах появляется возможность наблюдать флуктуации $\Delta\varphi$ и оценивать их статистические параметры.

В режиме оценки фазометром среднего значения фазового сдвига $\Delta\varphi$ за заданное число r периодов T в счетчиках СЧ1 и СЧ2 происходит накопление кодов от числа импульсов, поступивших на их входы за r периодов, т.е. кодов чисел nr и Nr соответственно, которые затем передаются в МПС.

Данным фазометром, как и ранее рассмотренными, малую погрешность измерения $\Delta\varphi$ можно получить только на достаточно низкой частоте исследуемых сигналов. Поэтому для расширения частотного диапазона фазометров используется предварительное гетеродинное преобразование сигналов.

9.6. Методы измерения фазового сдвига с преобразованием частоты

Для расширения диапазона частот фазометров применяют преобразование частоты исследуемых колебаний. Основным является гетеродинное преобразование частоты, позволяющее свести измерение фазового сдвига колебаний практически любых частот к измерению фазового сдвига на фиксированной промежуточной частоте.

При измерении малых фазовых сдвигов используют умножение частоты. В этом случае фазовый сдвиг между сигналами увеличивается во столько же раз, во сколько и частота. Это повышает точность измерений.

Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты

Структурная схема фазометра с подобным преобразованием показана на рис. 9.12. Пусть через входные цепи ВЦ1 и ВЦ2 на смесители СМ1 и СМ2 преобразователя частоты поступают соответственно сигналы $u_1 = U_{m1}\sin\omega t$ и $u_2 = U_{m2}\sin(\omega t - \varphi)$, имеющие друг фазовый сдвиг $\Delta\varphi = \varphi$, а также гармоническое напряжение гетеродина (Γ) $u_r = U_m\sin(\omega_r t + \varphi_r)$. На смеситель СМ1 воз-

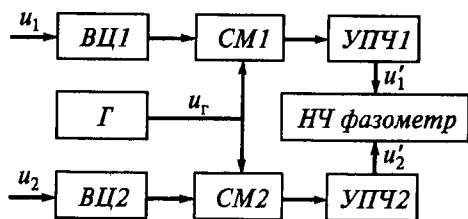


Рис. 9.12. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты

действует напряжение $u_1 + u_r$, а на СМ2 — $u_2 + u_r$. На выходе каждого из смесителей (относящихся к нелинейным или параметрическим каскадам) появляются колебания с суммарными, разностными и комбинационными частотами, составленными из частот анализируемых входных сигналов и напряжения гетеродина.

Сложные колебания с разностной (промежуточной) частотой $\omega_{пч} = |\omega - \omega_r|$ выделяются усилителями промежуточной частоты УПЧ1 и УПЧ2 каждого канала. Если в измерителе фазы с гетеродинным преобразованием частоты каскады ВЦ1 и ВЦ2, СМ1 и СМ2, УПЧ1 и УПЧ2 идентичны, то выходные сигналы усилителей промежуточной частоты u'_1 и u'_2 после простых преобразований можно представить в виде:

$$u'_1(t) = kU_{m1}U_{m_r}\cos(\omega - \omega_r)t; \quad (9.20)$$

$$u'_2(t) = kU_{m1}U_{m_r}\cos[(\omega - \omega_r)t - \varphi]. \quad (9.21)$$

В этих формулах k — постоянный коэффициент, характеризующий эффект преобразования сигналов.

Из (9.20) и (9.21) следует, что фазовый сдвиг двух сигналов, полученных на выходах УПЧ, равен фазовому сдвигу исследуемых сигналов u_1 и u_2 . Сигналы u'_1 и u'_2 поступают на низкочастотный (НЧ) фазометр, измеряющий фазовый сдвиг на промежуточной частоте. Чтобы проводить измерения в широком спектральном диапазоне сигналов, применяют гетеродин с перестраиваемой частотой. Разработаны фазометры с гетеродинным преобразованием частоты, работающие в диапазоне от 20 Гц до 20 МГц, а также в диапазоне СВЧ — 0,1...15 ГГц.

Фазометры с умножением частоты

Такие фазометры применяются для измерения малых фазовых сдвигов. В фазометре используется два одинаковых умножителя, на один из которых подается сигнал u_1 , а на второй — u_2 . Если эти сигналы имеют фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, то после умножения их частоты в n раз фазовый сдвиг увеличивается и становится равным $\Delta\varphi_1 = n\Delta\varphi$. Такой фазовый сдвиг можно измерить с меньшей погрешностью. Искомый фазовый сдвиг определяется как $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1/n$.

Фазометры с умножением частоты могут иметь дополнительную погрешность измерения, вызванную усилением влияния сторонних шумов. Такие шумы, поступая на оба умножителя вместе с сигналами u_1 и u_2 , вызывают

случайные отклонения фазы каждого из этих сигналов. Чем больше коэффициент умножения n , тем больше флюктуации фаз сигналов на выходе умножителей и погрешность измерений. Возможна также систематическая погрешность измерений, вызванная неидентичностью фазовых характеристик двух умножителей. Эту погрешность можно учесть и устранить, если подать на каждый умножитель частоты один и тот же сигнал (например, u_1). Показания фазометра, взятые с обратным знаком, следует использовать в качестве поправки для последующих измерений.

9.7. Измерение фазового сдвига фазовыми детекторами

Фазовый сдвиг между двумя гармоническими сигналами одной частоты можно измерить фазовым детектором. Одна из схем фазового детектора приведена на рис. 9.13. Сигналы u_1 и u_2 , между которыми измеряют фазовый сдвиг φ , преобразуют фазовым детектором в постоянное напряжение. На выходе его включают вольтметр (ЦФ), измеряющий постоянную составляющую напряжения между точками a и b , которое равно разности проректированных напряжений U_1 и U_2 . Если амплитуды исследуемых напряжений поддерживать постоянными, шкалу вольтметра можно проградуировать непосредственно в значениях фазового угла. С помощью фазового детектора получают погрешность измерений около $(2...3)^\circ$. Погрешность зависит от выполнения условий, накладываемых на параметры схемы и амплитуды исследуемых напряжений, от стабильности этих величин во времени, чувствительности вольтметра и т. д.

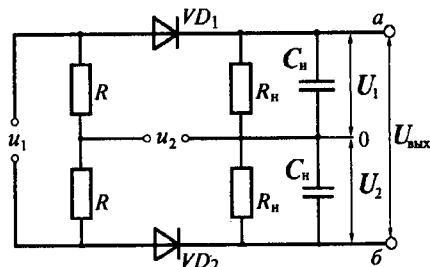


Рис. 9.13. Фазометр с фазовым детектором

Цифровые фазовые детекторы могут быть построены на цифровых логических схемах: элементе «Исключающее ИЛИ», JK -триггере и пр. При этом достаточно просто удастся получить длительность выходных импульсов, пропорциональную фазовому сдвигу между сигналами u_1 и u_2 , после чего сгладить эти импульсы в ФНЧ. На рис. 9.14, a в качестве примера приведена схема цифрового фазового детектора на элементе «Исключающее ИЛИ» (сумматор по модулю два).

Временные диаграммы работы схемы показаны на рис. 9.14, $b - z$. В этом детекторе из исследуемых синусоид u_1 и u_2 формируются соответствующие напряжения типа «меандр» (рис. 9.14, $b, в$). На выходе логического элемента вырабатываются импульсы напряжения y , длительность которых пропорцио-

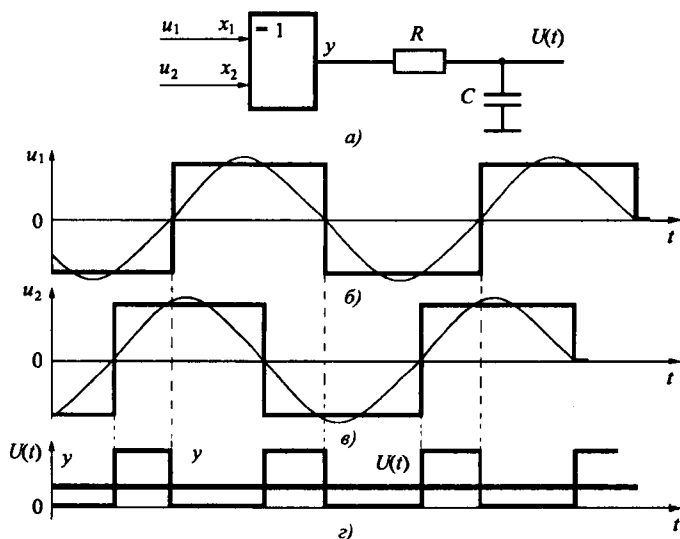


Рис. 9.14. Цифровой фазовый детектор на элементе «Исключающее ИЛИ»:
а — схема; *б* — гармонический сигнал u_1 и меандр; *в* — гармонический сигнал u_2 и меандр;
г — выходные сигналы элемента y и фазового детектора $U(t)$

нальна фазовому сдвигу входных сигналов (рис. 9.14, *г*). Далее этот сигнал подается на ФНЧ. Напряжение $U(t)$ на выходе ФНЧ пропорционально сдвигу сигнала u_1 относительно опорного u_2 .

Контрольные вопросы

1. Какой смысл вложен в понятие «фаза» сигнала?
2. Что называется фазовым сдвигом двух сигналов?
3. Перечислить основные методы измерения фазового сдвига.
4. В чем состоит метод линейной развертки измерения фазового сдвига?
5. Поясните, как измеряют сдвиг фазы методом эллипса.
6. Поясните метод круговой развертки измерения фазового сдвига.
7. Как работает фазометр с преобразованием фазы в интервал времени?
8. На каком принципе работают компенсационные фазометры?
9. Как измеряют фазовый сдвиг в СВЧ-диапазоне?
10. Пояснить принцип действия цифрового фазометра, измеряющего среднее значение фазы. Для пояснения нарисовать временные диаграммы.
11. Как работает цифровой фазометр на основе микропроцессора?
12. Как действует фазометр с гетеродинным преобразованием частоты?
13. В каких случаях применяются фазометры с умножением частоты?
14. Поясните принцип измерения сдвига фазы фазовым детектором.
15. Как измеряется фазовый сдвиг с помощью детектора на логическом элементе «Исключающее ИЛИ».

Глава 10. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

К измерению мощности в практической радиотехнике прибегают во всем частотном диапазоне — от постоянного тока до миллиметровых и более коротких длин волн. Измерять уровни мощности приходится в очень широких пределах — от 10^{-18} до 10^8 Вт.

В последние годы при измерениях наряду с абсолютными (ватт, милливатт и т.д.) широко используют относительные (логарифмические) единицы мощности (децибелы). Отметим, что относительные единицы измерения имеют ряд существенных преимуществ и применяются для оценки мощности источников радиотехнических сигналов, степени их усиления или ослабления, чувствительности приемных устройств, погрешностей измерений и пр.

Новые возможности в решении задач измерения мощности открыли достижения в области физики, микроэлектроники, и особенно цифровой техники, позволившие автоматизировать измерительную процедуру и проводить ее в интерактивном режиме.

10.1. Общие сведения

Как физическая величина, электрическая мощность определяется работой, совершаемой источником электромагнитного поля в единицу времени. Размерность электрической мощности записывается следующим образом: джоуль/сек = ватт.

Измерение мощности в различных частотных диапазонах имеет определенные особенности. Измерители электрической мощности промышленной частоты наряду со счетчиками энергии являются основой действующей системы учета потребления электрической энергии в народном хозяйстве. Измерение мощности на постоянном токе, а также в диапазоне звуковых и высоких частот имеет ограниченное значение, поскольку на частотах до нескольких десятков мегагерц часто удобнее измерять напряжения, токи и фазовые сдвиги, а мощность определять расчетным путем. На частотах свыше 300 МГц вследствие волнового характера процессов значения напряжения и токов теряют однозначность и результаты измерений начинают зависеть от места подключения прибора. Вместе с тем поток мощности через любое поперечное сечение линии передачи всегда остается неизменным. По этой причине основным параметром, характеризующим режим работы устройства СВЧ, становится мощность.

Активная (поглощаемая электрической цепью) мощность однофазного переменного тока определяется как

$$P = UI \cos \varphi, \quad (10.1)$$

где U, I — средние квадратические значения напряжения и тока; φ — сдвиг фазы между мгновенными значениями напряжения и тока.

Если нагрузка R_n в электрической цепи чисто активная ($\varphi = 0$), то мощность переменного тока

$$P = UI = I^2 R_n = U^2 / R_n. \quad (10.2)$$

Для сигнала произвольной формы, имеющего периодическую структуру, электрическую мощность можно оценить с помощью ряда Фурье:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n, \quad (10.3)$$

где U_0, I_0 — постоянные составляющие; U_n, I_n — средние квадратические значения гармоник напряжения и тока; φ_n — фазовый сдвиг между гармониками напряжения U_n и тока I_n .

Электрическую мощность переменного тока можно измерять непосредственно с помощью специальных приборов — *ваттметров*, или косвенно путем измерения величин, входящих в приведенные соотношения. Принцип действия ваттметров основан на реализации операции умножения. Применяют устройства прямого и косвенного перемножения. Примерами устройств прямого перемножения являются измерительные механизмы ваттметров электродинамической системы. Прямое перемножение напряжения и тока можно обеспечить с помощью преобразователей Холла, или специальных схем на полевых транзисторах и т. д.

В устройствах косвенного перемножения произведение величин находят в результате использования таких математических операций, как сложение (вычитание), возведение в степень, логарифмирование, интегрирование и пр. Для этих целей служат аналоговые интегральные перемножители. Современные ваттметры на частоты 1...10 МГц строятся на основе интегральных перемножителей с использованием термопреобразователей.

10.2. Измерение мощности в диапазонах низких и высоких частот

При прямых измерениях в диапазонах частот до нескольких (1...10) кГц могут иногда использоваться электродинамические ваттметры.

Электродинамические ваттметры

Принцип действия электродинамического ваттметра основан на том, что угол поворота α рамки (со стрелкой) электродинамического прибора пропорционален произведению токов, умноженному на косинус угла φ между ними:

$$\alpha = k I_1 I_2 \cos \varphi, \quad (10.4)$$

где k — постоянный для данного прибора коэффициент.

Пусть требуется измерить активную мощность, потребляемую некоторой нагрузкой Z_n , к которой приложено действующее значение напряжения U_n и через нее протекает гармонический ток со средним квадратическим значением I_n и сдвинутый по фазе на угол φ по отношению к напряжению.

Схема включения катушек ваттметра показана на рис. 10.1, где $R_{доб}$ — добавочное сопротивление. Если параметры ваттметра выбраны так, что $R_{доб} \gg Z_n$, то ток в неподвижной катушке $I_1 \approx I_n$, а в подвижной — $I_2 \approx U_n/R_{доб}$. Поэтому угол отклонения стрелки α ваттметра с учетом (10.4) будет пропорционален активной мощности в нагрузке P :

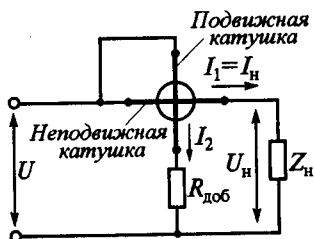


Рис. 10.1. Схема электродинамического ваттметра

$$\alpha \approx (k I_n U_n / R_{доб}) \cos \varphi \approx kP, \quad (10.5)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Ваттметры электродинамической системы могут применяться для измерения электрической мощности в цепях как постоянного, так и переменного тока, но наиболее широко используют их для измерения мощности промышленной частоты.

Ваттметры на интегральных аналоговых перемножителях

Интегральный перемножитель сигналов реализует передаточную функцию

$$P_{вых} = k_a u_1 u_2,$$

где k_a — масштабный коэффициент, а u_1 и u_2 — перемножаемые аналоговые напряжения.

Рассмотрим упрощенную структурную схему аналогового интегрального перемножителя двух напряжений (рис. 10.2), в основу принципа действия которого заложен *четырехквадрантный* метод перемножения. В этой схеме (в технике измерения мощностей ее иногда называют *квадратором*) приняты следующие обозначения: (+) — сумматор; (−) — вычитающее устройство; (K_0) — устройство возведения в квадрат; ($:4$) — делитель напряжения на четыре (этот элемент необязателен).

При перемножении двух аналоговых напряжений производятся операции: суммирование: $u_1 + u_2$;

вычитание: $u_1 - u_2$;

возведение в квадрат: $(u_1 + u_2)^2$, $(u_1 - u_2)^2$;

вычитание квадратов: $(u_1 + u_2)^2 - (u_1 - u_2)^2 = 4u_1 u_2$;

деление напряжения на четыре: $4u_1 u_2 / 4 = u_1 u_2$.

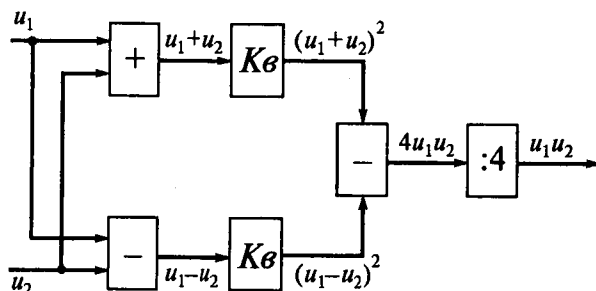


Рис. 10.2. Структурная схема аналогового перемножителя сигналов

Чтобы применить перемножитель сигналов в схеме ваттметра, достаточно в качестве выходного каскада измерителя включить низкочастотный фильтр.

Если напряжения $u_1 = U_m \cos \omega t$ и $u_2 = I_m R \cos(\omega t - \varphi)$, где R — эталонное сопротивление, то сигнал на выходе: $P_{\text{вых}} = k_a U_m I_m R (\cos \omega t) \cos(\omega t - \varphi)$. Приняв коэффициент $k_a = 1$, сопротивление $R = 1 \text{ Ом}$ и учитывая формулу произведения двух косинусов, получим: $P_{\text{вых}} = 0,5 U_m I_m \cos \varphi + 0,5 U_m I_m \cos(2\omega t - \varphi)$. Выделенная специальным низкочастотным фильтром постоянная составляющая данной мощности будет пропорциональна измеряемой мощности, т.е. $P_0 = 0,5 U_m I_m \cos \varphi = UI \cos \varphi$.

В перемножителях используют идентичные, со стабильными параметрами нелинейные элементы, имеющие квадратичные характеристики.

Более высокую точность измерения мощности по методу прямого умножения двух сигналов обеспечивает операция интегрирования, которую применяют в прецизионных измерительных преобразователях активной мощности промышленной частоты.

По уровню измеряемых электрических мощностей все измерители мощности делятся на ваттметры малой (до 10 мВт), средней (10 мВт...10 Вт) и большой мощностей (свыше 10 Вт).

10.3. Измерение мощности СВЧ-колебаний

Большое практическое значение имеет измерение мощности СВЧ-колебаний. Способы измерения мощности СВЧ существенно отличаются от рассмотренных. Все они основаны на эквивалентном преобразовании энергии исходных электромагнитных колебаний в другой вид энергии, удобный для измерения. Косвенные методы, изложенные выше, не находят применения, так как токи и напряжения различны в разных сечениях линии передач (стоячие волны) и подключение измерительного прибора меняет режим работы измерительной

цепи. Поэтому в СВЧ-диапазоне используют методы преобразования энергии электромагнитных колебаний в другой вид энергии, удобный для измерения.

Различают два основных метода измерения мощности СВЧ-колебаний.

1. *Измерение мощности источника электромагнитных колебаний* (генератора).

Согласно общепринятому определению, под мощностью генератора понимают мощность, отдаваемую им в согласованную нагрузку (рис. 10.3, а). В этом случае измеряемая мощность полностью рассеивается на некотором измерительном эквиваленте нагрузки с последующим измерением мощности теплового процесса. Такие измерители мощности называются *ваттметрами поглощающего типа*. Так как нагрузка должна полностью поглощать измеряемую мощность, то использование прибора возможно лишь при отключенном потребителе. Результат измерения будет наиболее точным, если входное сопротивление измерительного прибора полностью согласовано с выходным сопротивлением исследуемого генератора или волновым сопротивлением линии передачи, т. е. $R_r = R_n$; $x_r = -x_n$.

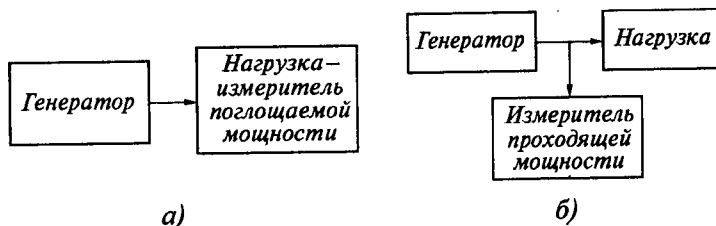


Рис. 10.3. Способы измерения мощности ваттметром:
а — поглощающей мощности; б — проходящей мощности

2. *Измерение электрической мощности, выделяемой в нагрузке, полное сопротивление которой может быть произвольно.* В этом случае между генератором и нагрузкой включается специальное устройство, преобразующее в другую форму лишь незначительную часть передаваемой по линии энергии и не нарушающее процесса ее передачи (рис. 10.3, б).

Измерение мощности с помощью резистивных термочувствительных элементов (терморезисторов)

Наиболее распространенным методом измерения малых мощностей, на котором построены промышленные ваттметры, является метод измерения сопротивления терморезистора при рассеянии в нем электромагнитной энергии. В качестве резистивных термочувствительных элементов используются болометры, сопротивление которых растет с повышением температуры (положительный температурный коэффициент сопротивления), и термисторы, сопротивление которых с ростом температуры падает.

Основными преимуществами термисторов по сравнению с болометрами являются их более высокая чувствительность и большая устойчивость к перегрузкам.

Термистором называют терморезистор, изготовленный из специального полупроводникового материала, обладающего большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, т.е. температурная характеристика термистора — отрицательная. Применяют два типа термисторов: стержневой и бусинковый. Стержневые термисторы обладают более высокой электрической прочностью и имеют относительно меньшее реактивное сопротивление. Термисторы бусинкового типа при прочих равных условиях имеют меньшую поверхность охлаждения и поэтому обладают большей чувствительностью. Чувствительность термистора высокая — от 10 до 100 Ом/мВт. Для получения высокой чувствительности рабочую точку термистора выбирают на участке с максимальной крутизной характеристики.

Болометр — проволочный или пленочный терморезистор с положительной температурной характеристикой, помещенный в стеклянный (вакуумный или наполненный инертным газом) баллон. Для увеличения чувствительности нить выполнена из материала с высоким температурным коэффициентом сопротивления. Болометры менее чувствительны, чем терморезисторы, но имеют более стабильные, не зависящие от температуры окружающей среды характеристики.

Термистор или болометр помещают внутрь измерительной головки, состоящей из отрезка волновода или коаксиальной линии. Изменение сопротивления терморезистора при рассеянии в нем электромагнитной энергии измеряется обычно с помощью мостовых схем. Используют два способа измерения сопротивления термистора: с помощью неуравновешенного и уравновешенного мостов. Неуравновешенные мосты применяют для построения измерителей мощности по типу приборов прямого действия, уравновешенные — в ваттметрах, основанных на методе сравнения.

Схема неуравновешенного моста с терморезистором представлена на рис. 10.4.

Исходное уравновешивание моста (при отсутствии измеряемой мощности СВЧ) обеспечивают схемой температурной компенсации, состоящей из потенциометра R плавной регулировки и вспомогательного генератора Γ с частотой выходных колебаний 50...100 кГц. При равновесии моста ток в измерительной диагонали и показания гальванометра равны нулю.

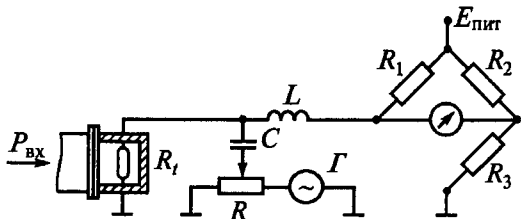


Рис. 10.4. Схема неуравновешенного моста

Измеряемую мощность СВЧ $P_{\text{вх}}$ подают на термистор R_t . Если схема измерителя согласована с генератором, то мощность полностью рассеивается на термисторе. В результате его сопротивление понизится и через гальванометр начнет протекать ток. Шкалу гальванометра градуируют в единицах мощности, используя калиброванный источник постоянного тока $E_{\text{пит}}$.

К преимуществу измерителей электрической мощности с неуравновешенными мостами относится наглядность индикации результата измерений, а к недостатку — сравнительно малая точность. Последнее объясняется двумя основными причинами. Во-первых, неизбежное при измерении мощности СВЧ изменение сопротивления термистора влечет за собой нарушение согласования сопротивлений термисторной камеры и линии передачи электромагнитных колебаний. Вследствие этого возникает частичное отражение электромагнитной волны от нагрузки, а значит, неполное рассеяние измеряемой мощности на термисторе. Во-вторых, по мере естественного изменения характеристик термистора (или при его замене) нарушается установленное при градуировке соответствие между показаниями прибора и величиной рассеиваемой мощности.

Более высокую точность измерений обеспечивают уравновешенные мосты, в которых измеряемую мощность СВЧ сравнивают с калиброванной мощностью постоянного тока. Пример одной из схем измерительного уравновешенного моста с терморезистором представлен на рис. 10.5.

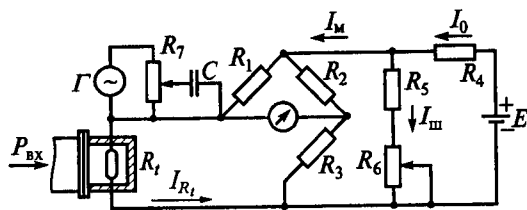


Рис. 10.5. Схема уравновешенного моста с терморезистором

Терморезистор R_t , находящийся в измерительной головке, включают в одно из плеч моста. Остальными плечами моста являются резисторы R_1, R_2, R_3 , равные по величине R_{t0} — сопротивлению терморезистора в рабочей точке. Напряжение питания E на мост подается через резистор R_4 , сопротивление которого велико и поэтому через него протекает достаточно малый ток питания I_0 . Параллельно мосту включен делитель из сопротивлений R_5, R_6 . Резистор R_6 представляет собой реостат, с движком которого связана измерительная шкала (на рис. 10.5 не показана); через этот резистор протекает ток $I_{\text{ш}}$, отсчитываемый по шкале. От сопротивления резистора R_6 зависит ток I_{R_t} , протекающий через терморезистор: поскольку ток питания моста $I_{\text{м}} = I_0 - I_{\text{ш}}$, то когда мост уравновешен, ток $I_{R_t} = 0,5 I_{\text{м}}$.

До подачи мощности СВЧ мост сбалансирован за счет двух источников питания: постоянного тока и переменного тока генератора G . При этом поло-

жение движка резистора R_6 такое, чтобы сопротивление R_6 было максимальным, если используется термистор, или минимальным, если используется болометр. При подаче СВЧ-колебания баланс моста нарушается, и его восстанавливают, изменяя ток питания моста (а, следовательно, и терморезистора) с помощью сопротивления R_6 и источника питания E . Для термисторов нужно увеличивать шунтирующее действие, т.е. уменьшать сопротивление R_6 , а для болометров — наоборот. Как правило, шкала движка R_6 градуируется непосредственно в ваттах. Начальная балансировка моста переменным напряжением генератора Γ позволяет исключить влияние температуры окружающей среды и сохранить градуировку при старении терморезисторов и их замене.

Промышленные терморезисторные ваттметры имеют общую абсолютную погрешность порядка 4...10 %. Погрешности измерения таких ваттметров определяются в основном степенью согласованности нагрузки и качеством измерительной головки.

Измерение мощности термопарами

Данный метод измерения основан на регистрации значения термоЭДС, возникающей при нагревании термопары энергией СВЧ. Структурная схема ваттметра состоит из приемного термопреобразователя и измерительной части. Основным элементом преобразователя является блок высокочастотных дифференциальных термопар, одновременно выполняющих функции согласованной нагрузки и дифференциального термометра. В СВЧ-диапазоне чаще применяют термопары в виде тонких металлических пленок, напыленных на диэлектрическую подложку. Основным элементом измерительной части прибора является вольтметр постоянного тока с цифровым дисплеем.

К преимуществам таких ваттметров следует отнести малую зависимость результатов измерения от колебаний температуры окружающей среды и малое время подготовки прибора к работе. Недостатки ваттметров: ограниченный верхний уровень динамического диапазона и недостаточная устойчивость к перегрузкам, ограничивающая допустимое значение средней мощности при измерении импульсных сигналов. Практически стандартные термисторы способны выдерживать без разрушения мощность, не превышающую 50...75 мВт. Уровень измеряемой мощности может быть несколько увеличен, если перед термисторной камерой поместить калиброванный аттенюатор.

Аттенюатор — устройство, у которого выходная мощность $P_{\text{вых}}$ в заданное число раз меньше входной мощности $P_{\text{вх}}$. Результат измерения равен показанию прибора, умноженному на коэффициент ослабления аттенюатора: $k_{\text{осл}} = P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}}$. Аттенюаторы различают по принципу действия (поглощающие, предельные) и конструкции (волноводные, коаксиальные, полосковые). Они бывают с фиксированным или изменяемым коэффициентом ослабления (затухания).

Волноводный поглощающий аттенуатор состоит из отрезка волновода, внутри которого помещен слой вещества, эффективно поглощающего СВЧ-энергию. Коэффициент ослабления (поглощения) энергии определяется свойствами вещества, а также размерами и расположением поглощающего слоя относительно электрической составляющей электромагнитного поля волновода.

В *предельных аттенуаторах* используется явление экспоненциального затухания электромагнитного поля вдоль волновода, поперечные размеры которого выбраны меньше критических для рабочей длины волны.

Аттенуаторы с плавным изменением коэффициента затухания и шкалой, проградуированной в децибелах, обычно применяются в приборах, результат измерения которыми фиксируется в относительных единицах.

Калориметрический метод измерения мощности

Калориметрический метод измерения мощности отличается высокой точностью, является универсальным и используется во всем радиотехническом диапазоне частот, как для малых, так и для больших мощностей. Метод основан на преобразовании энергии электромагнитных колебаний, поглощаемых согласованной нагрузкой, в тепловую. Поглощение энергии поглотителем, составляющим основной элемент прибора, можно зарегистрировать либо непосредственно по изменению его температуры, либо косвенно как изменение объема, давления или других характеристик.

Надежные калориметрические методы отличаются обратимостью в том смысле, что с поглотителем не происходит никаких необратимых изменений и все калориметры возвращаются в свое первоначальное состояние за время установления равновесия.

Калориметрические измерители состоят из двух частей: поглощающей нагрузки и измерителя температуры. Наиболее распространены нагрузки с проточной водой. Мощность, поглощаемая в водяной нагрузке с проточной водой, определяется по разности температур ΔT на выходе и входе нагрузки калориметра и по скорости расхода протекающей воды v . Для определения величины уровня мощности пользуются формулой:

$$P = 4,17sGd\Delta T, \quad (10.6)$$

где s — удельная теплоемкость жидкости (для воды $s = 1$); G — расход воды — объем воды, протекающей через нагрузку, $\text{см}^3/\text{с}$; d — удельная масса поглощающей нагрузки; ΔT — разность температур на входе и выходе калориметра. При постоянных показателях s , G и d измеряемая мощность пропорциональна разности температур: $P = 4,17\Delta T$.

Структура построения водяной калориметрической нагрузки показана на рис. 10.6. Внутри отрезка волновода 1 закреплен стеклянный конус 2, через который протекает вода. В основание конуса впаяны две трубки 3 и 4. Вода входит в трубку 4, а вытекает через трубку 3. Нагрузка соединяется с источ-

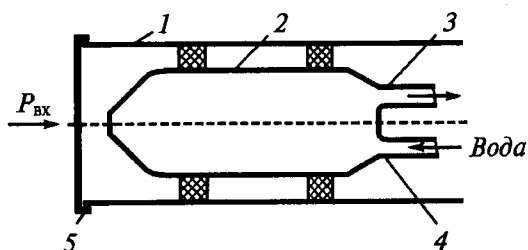


Рис. 10.6. Водяная поглощающая нагрузка калориметрического ваттметра

ником измеряемой мощности соединительным фланцем 5. Заполненный водой конус представляет собой нагрузку с большим затуханием. Разность температур измеряется термопарами, включенными на входе и выходе воды в нагрузку.

Термопары включены встречно, так что индикаторный прибор фиксирует разность температур. Как уже говорилось, калориметрический метод самый точный. Погрешности образцовых калориметров составляют около 1 %, а промышленные калориметры обеспечивают погрешность 2,5...5 %.

Ваттметры проходящей мощности

Под проходящей мощностью $P_{\text{пр}}$ понимают разность мощностей падающей $P_{\text{пад}}$ и отраженной $P_{\text{отр}}$ электромагнитных волн:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}. \quad (10.7)$$

Проходящую мощность электромагнитной волны можно измерить рассмотренными ранее ваттметрами, используемыми совместно с *направленными ответвителями*, или приборами, действие которых основано на использовании физических явлений, не требующих полного поглощения измеряемой энергии. К таким приборам относятся измерители мощности на преобразователях Холла, с поглощающей стенкой и др. В последние годы для измерения мощности СВЧ-колебаний начали использовать эффект так называемых горячих носителей тока в полупроводниках.

В волноводных измерителях мощности разделение падающих и отраженных волн СВЧ-энергии производят волноводным направленным ответвителем, упрощенная структурная схема которого представлена на рис. 10.7.

Структура классического направленного ответвителя содержит две волноводные линии: главную A и вспомогательную B , имеющие общую стенку. По главной волноводной линии распространяется падающая волна от генератора к нагрузке и отраженная от нагрузки к генератору. Вспомогательная волноводная линия работает в режиме согласования с обеих сторон. Между главной и вспомогательной линиями имеются отверстия в общей стенке. Расстояние между отверстиями cd равно четверти длины волны, распространяющейся в главной линии. Через отверстия c и d падающая и отраженная волны проникают во вспомогательную линию, но фазовые сдвиги этих волн таковы, что около отверстия d падающие волны складываются — точка l , а отраженные — вычитаются и взаимно

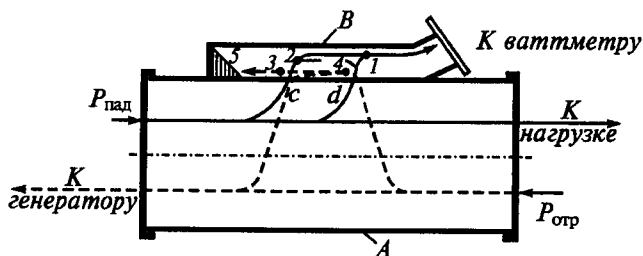


Рис. 10.7. Использование направленного ответвителя в ваттметрах

компенсируются — точка 2. Около отверстия *c*, наоборот, складываются отраженные волны — точка 3 и взаимно компенсируются падающие — точка 4. В результате падающая волна поступает на ваттметр, а мощность отраженной волны рассеивается на согласованной нагрузке 5. Таким образом измеряется мощность падающей волны. Измерение мощности отраженной волны, необходимое для определения проходящей мощности, может осуществляться тем же ответвителем, или вторым, развернутым на 180° .

Достоинствами ваттметров на основе направленных ответвителей являются широкие пределы измеряемой мощности $10^{-4} \dots 10^5$ Вт; возможность раздельного измерения падающей, отраженной и проходящей мощности. Диапазон частот таких ваттметров $0,03 \dots 40$ ГГц, пределы допускаемых погрешностей $2,5 \dots 10\%$.

Измерение мощности преобразователями Холла

Прямое перемножение при измерении мощности можно также получить, используя полупроводниковые преобразователи Холла.

Если специальную полупроводниковую пластину, по которой течет ток I (показан пунктиром на рис. 10.8, а), возбуждаемый электрическим полем напряженностью E , поместить в магнитное поле с напряженностью H (индукцией B), то между ее точками, лежащими на прямой, перпендикулярной направлениям протекающего тока I и магнитного поля, возникает разность потенциалов (эффект Холла), определяемая как

$$U_x = kEH, \quad (10.8)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Согласно известной в физике теоремы Умова–Пойнтинга, плотность потока проходящей мощности СВЧ-колебаний в некоторой точке поля определяется векторным произведением электрической и магнитной напряженностей этого поля: $P = [E \cdot H]$. Отсюда, если ток I будет функцией электрической напряженности E , то с помощью датчика Холла можно получить следующую зависимость напряжения от проходящей мощности: $U_x = gP$, где g — постоянный коэффициент, харак-

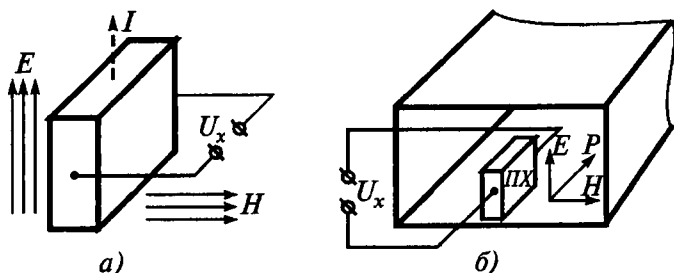


Рис. 10.8. Преобразователи Холла:
 а — возникновение эффекта в электромагнитном поле;
 б — принцип измерения мощности в волноводе

теризующий образец — частоту и пр. Для измерения такой мощности пластину полупроводника (пластинку Холла — ПХ) помещают в волновод, как показано на рис. 10.8, б.

Рассмотренный измеритель проходящей мощности обладает следующими достоинствами:

- может работать при любой нагрузке, а не только при согласованной;
- высокое быстродействие ваттметра дает возможность применять его при измерении импульсной мощности.

Однако практическая реализация ваттметров на эффекте Холла — достаточно сложная задача в силу многих факторов. Тем не менее, существуют ваттметры, измеряющие проходящую импульсную мощность до 100 кВт с погрешностью не более 10 %.

Ваттметры на основе эффекта «горячих» носителей тока

Из физики известно, что под воздействием электрического поля в полупроводнике увеличивается средняя хаотическая скорость свободных носителей заряда (электронов или дырок), что эквивалентно повышению их температуры относительно температуры кристаллической решетки материала. Это явление в теории полупроводников называется *разогревом носителей зарядов*.

Если осуществить неоднородный «разогрев» полупроводниковой пластины, то должен возникнуть поток носителей зарядов из «горячей» области в «холодную». Вместе с тем оказывается, что ток в разомкнутой цепи равен нулю. Это обстоятельство свидетельствует о возникновении ЭДС, противодействующей движению зарядов. Величина такой ЭДС зависит от степени «разогрева» полупроводниковой пластины.

Для усиления эффекта неоднородному «разогреву» следует подвергать полупроводник, концентрация носителей в котором пространственно неоднородна. Если «разогрев» осуществляется полем СВЧ, то по значению ЭДС можно судить о проходящей мощности СВЧ. Поскольку интервал установле-

ния температуры носителей зарядов на несколько порядков меньше времени установления температуры кристаллической решетки, ваттметры на основе разогрева носителей зарядов позволяют непосредственно измерять импульсную мощность при длительностях импульсов до 0,1 мкс.

Основными узлами такого ваттметра являются приемный преобразователь с полупроводниковым элементом и измерительное устройство с цифровым отсчетом.

10.4. Измерение мощности лазерного излучения

Мощность и энергия излучения лазеров — это различные, хотя и тесно связанные друг с другом величины. Мощность и энергию лазерного излучения обычно называют энергетическими параметрами. *Лазерное излучение* принято характеризовать следующими параметрами:

- мощностью излучения P при работе лазера в непрерывном режиме;
- энергией излучения одиночных импульсов

$$W = \int_0^{\tau_n} P(t) dt, \quad (10.9)$$

где τ_n — длительность импульса излучения;

- средней мощностью в импульсе

$$P_{\text{ср и}} = W / \tau_n; \quad (10.10)$$

- средней мощностью импульсно-модулированного излучения

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt. \quad (10.11)$$

Здесь T — период следования импульсов.

Измерения энергии и мощности лазерного излучения не отличаются достаточно высокой точностью (ошибки измерения около 2,5 % и редко понижаются до 0,5 %).

Мощность и энергию излучения лазеров измеряют различными методами, в том числе и методами, применяемыми для СВЧ-диапазона. Однако их реализация для волн оптического диапазона имеет некоторые отличия.

Для измерения импульсов лазерного излучения с энергией менее 10^{-3} Дж применяют *вакуумный микрокалориметр* с поглотителем в виде миниатюрного конуса, изготовленного из медной фольги и имеющего массу около 0,1 г. Измеряемое излучение направляют в поглотитель с помощью короткофокусной линзы. Изменение температуры поглотителя регистрируется дифференциальной медно-константановой термопарой. Один из спаев термопары укреплён на вершине конуса, а другой (холодный) присоединен к траверсе, вы-

ходящей наружу через ножку колбы. Конус вклеен в слюдяную пластину, закрепленную в специальных держателях. При использовании гальванометра чувствительность прибора составляет 0,8 мДж на деление шкалы.

Измеряют энергию лазера и *жидкостными калориметрами*, подобным рассмотренным в разд. 10.2. Основной недостаток калориметров с датчиками температуры — большое время установления теплового равновесия (единицы минут). За это время часть тепла теряется на излучение и конвекцию, что является причиной дополнительных погрешностей измерения уровня поглощаемой энергии. Этому недостатка лишены жидкостные калориметры для измерения больших энергий излучения, работающие подобно термометрам.

Примером такого калориметра может служить специальный сосуд, наполненный раствором нитрата меди в ацетонитриле. Концентрацию нитрата меди подбирают так, чтобы коэффициент пропускания ячейки длиной 75 мм составлял 10^{-4} для падающей энергии излучения на длине волны рубинового лазера. Сосуд связан с тонким капилляром диаметром 0,1 мм, в который может выходить жидкость при расширении. Обычно уровень жидкости устанавливается так, что ее подъему на 25 мм соответствует увеличение измеряемой энергии на 2,5 Дж.

Фотоэлектрические измерители лазерного излучения

Фактически любой фотоприемник, выходной сигнал которого пропорционален падающему лучистому потоку, позволяет измерять мощность непрерывного излучения лазеров или энергию их импульсного излучения. Для измерения средней мощности излучения лазеров непрерывного действия применяют полупроводниковые фотоприемники с *p-n*-переходом. Энергию излучения лазеров, работающих в импульсном режиме, измеряют интегрированием выходного сигнала фотоприемника.

Измерители больших импульсных мощностей лазерного излучения

Большие импульсные мощности часто измеряют с помощью различных эффектов в кристаллах, прозрачных для лазерного излучения.

Сегнетоэлектрический измеритель мощности. При падении излучения на сегнетоэлектрик (пирозлектрик) на кристалле или на последовательно соединенном с ним резисторе удается получить пирозлектрическое напряжение, которое можно измерить.

В качестве сегнетоэлектриков применяют титанат бария, титанат свинца, моногидрат сульфата лития и др. Для измерения силы пиротока на противоположные стороны кристалла напыляют серебряные или золотые электроды (рис. 10.9, а).

Приемник обычно выполняют в виде цилиндрического конденсатора с круглым или прямоугольным входным отверстием. Сфера состоит из двух полусфер, изготовленных из пироактивной керамики титаната бария и со-

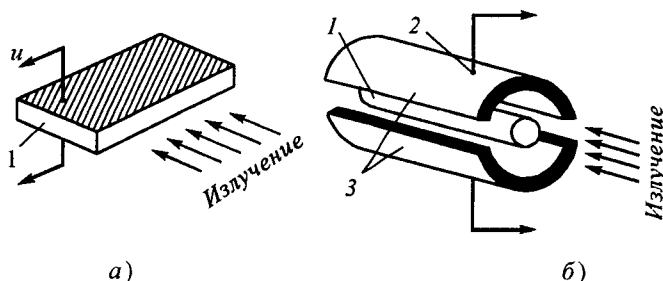


Рис. 10.9. Схемы измерителей больших импульсных мощностей: *а* — на сегнетоэлектрике; *б* — на обратном электрооптическом эффекте; 1 — измеритель; 2 — электроды; 3 — пластины конденсатора

единенных специальным образом. На внешнюю и внутреннюю поверхности полусфер наносят серебряные электроды, к которым присоединяются тонкие проводники. Для измерения высоких интенсивностей излучения внутреннюю поверхность сферы покрывают тугоплавким слоем с большой отражательной способностью — например, слоем платины толщиной 0,1 мм.

Измеритель мощности излучения с использованием обратного электрооптического эффекта. Данный эффект состоит в том, что при падении монохроматического излучения на некоторые кристаллы в них возникает поляризация. Если такой кристалл поместить в конденсатор специальной формы (рис. 10.9, б), то измеряемая мощность излучения будет связана с напряжением U на зажимах конденсатора определенным соотношением.

Наиболее эффективно использовать полупроводники при измерении мощности лазеров, работающих в инфракрасном диапазоне (например, лазеров на CO_2). Верхний уровень измеряемой мощности определяется оптической прочностью кристалла, которая для пьезокристаллов находится в пределах $(0,15 \dots 1) \cdot 10^{10} \text{ Вт/см}^2$, что сравнимо с оптической прочностью оптических стекол лучших марок, используемых в лазерах.

Измеритель мощности с использованием обратного электрооптического эффекта содержит прозрачный для измеряемого излучения кристалл; конденсатор с помещенным в него кристаллом, с пластин которого снимается напряжение, пропорциональное пиковой мощности импульса лазера; электронную схему для измерения наведенной ЭДС (как правило, вольтметра амплитудного значения). Для регистрации длительности лазерного импульса при измерении энергии излучения к измерителю мощности может подключаться осциллограф.

Пондеромоторный ваттметр. Действие пондеромоторного (механического) измерителя основано на использовании светового давления. Давление электромагнитных волн на отражающую поверхность пропорционально зна-

чению вектора Умова – Пойнтинга, который определяет плотность потока энергии, проходящей ежесекундно через единичную площадь. Такие приборы применяют для измерения энергии и мощности излучения лазеров, работающих как в импульсном, так и непрерывном режимах. Верхний предел измеряемых величин мощности или энергии практически не ограничен. Пондеромоторные измерители мощности обладают высокой точностью измерений, потребляют незначительную мощность, малоинерционны и не боятся перегрузок. Их недостатком является низкая виброустойчивость и необходимость тщательного согласования и изготовления деталей по высшему классу точности.

10.5. Цифровые ваттметры

Повсеместно внедряемая в последние годы в измерительной технике автоматизация процесса измерения распространилась и на средства измерения мощности. Необходимость в автоматизации средств измерения мощности возникла по двум причинам: во-первых, из-за развития автоматических систем контроля и, во-вторых, из-за сложности управления работой, связанной с балансировкой мостовых схем, которые являются основным элементом любого терморезисторного ваттметра.

В цифровых ваттметрах применяют различные типы преобразователей мощности, в том числе и терморезисторные.

Упрощенная структурная схема цифрового ваттметра дана на рис. 10.10.

Основным элементом схемы ваттметра является микропроцессор. УПТ усиливает выходное напряжение термоэлектрического приемного преобразователя до значения, обеспечивающего устойчивую работу блока АЦП. На-

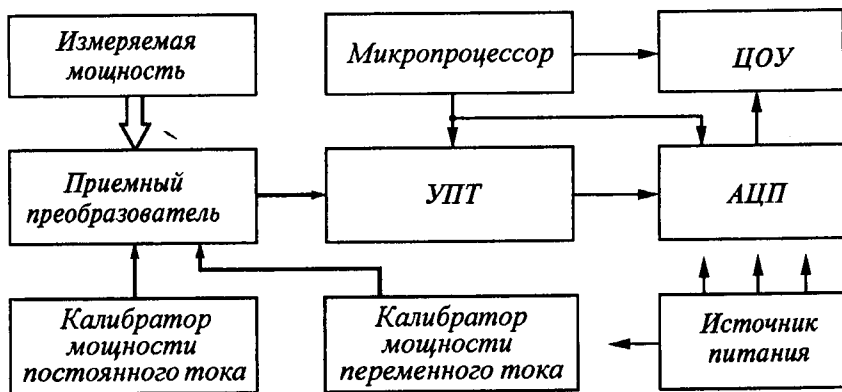


Рис. 10.10. Упрощенная структурная схема цифрового ваттметра

пряжение, пропорциональное значению измеряемой мощности, преобразуется с помощью времяимпульсного преобразователя (на схеме не показан) в интервал времени, который заполняется импульсами опорной частоты. Число импульсов, пропорциональное измеряемой мощности, отображается на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ) или может вводиться в специализированное устройство обработки измерительной информации.

Микропроцессор ваттметра содержит элементы автоматического управления режимами работы и дистанционного переключения пределов измерения, индикации условного обозначения измеряемой величины. Калибратор мощности переменного тока используется для самокалибровки ваттметра. Калибратор мощности постоянного тока применяется для калибровки цифрового ваттметра, работающего с преобразователями на средних и больших уровнях мощности. Все узлы ваттметра запитываются от встроенного источника питания постоянного тока.

Приемный преобразователь состоит из отрезка коаксиальной линии (или волновода) со стандартным высокочастотным разъемом, поглощающего элемента, термоэлектрического модуля, «образца сравнения». Поглощающий элемент представляет собой тонкопленочный резистор на теплопроводящей (бериллиевой) керамике. Центральным проводником коаксиального тракта является тонкостенная трубка из нержавеющей стали, исключая тепловое влияние внешней среды на поглощающий элемент. Для уменьшения потерь на СВЧ трубка покрывается медью и серебром. Поглощающий элемент за счет плотной посадки имеет электрический контакт с центральным проводником. Другой его конец впаян в согласующий медный экран с серебряным покрытием. В согласующем экране предусмотрено ступенчатое изменение диаметра, что обеспечивает согласование поглощающего элемента с трактом во всем диапазоне частот.

Термоэлектрический модуль представляет собой диск с отверстием и расположен так, что горячий спай имеет тепловой контакт с внешней поверхностью согласующего экрана в месте пайки поглощающего элемента, а холодный спай — с «образцом сравнения». К выводам термоэлектрического модуля припаиваются провода соединительного кабеля. Для защиты модуля от случайных внешних тепловых воздействий используются внутренний и внешний экраны. На внешнем экране укреплены ребра, образующие вместе с экраном радиатор. Применение радиатора позволяет увеличить мощность рассеяния преобразователя.

В цифровом ваттметре благодаря применению микропроцессора осуществляется ряд автоматизированных операций: автоматический выбор пределов измерений, автоматическая установка нуля и самокалибровка; кроме того, предусматривается выход информации на канал общего пользования при его включении в состав информационно-измерительной системы.

Контрольные вопросы

1. Что собой представляет такая физическая величина, как мощность электрических колебаний?
2. Как записывается аналитическое выражение для активной мощности в случае периодического сигнала?
3. Перечислить основные методы измерения мощностей в различных частотных диапазонах.
4. Объяснить принцип действия электродинамического ваттметра.
5. Какой алгоритм математических операций лежит в основе ваттметра на перемножителях.
6. Каковы особенности измерения мощности электромагнитных колебаний в диапазоне СВЧ?
7. Как строятся ваттметры поглощающей мощности для диапазона СВЧ?
8. Приведите пример ваттметра поглощающей мощности.
9. В чем заключается терморезисторный метод измерения электрической мощности в СВЧ-диапазоне?
10. Какие типы мостов применяют для измерения мощности с помощью терморезисторов?
11. Приведите схему неуравновешенного моста.
12. Приведите схему уравновешенного моста.
13. В чем заключается метод измерения электрической мощности с помощью термомпар?
14. На чем основан калориметрический метод измерения мощности?
15. Как работают ваттметры проходящей мощности? Привести примеры.
16. На каком принципе основаны измерители мощности, использующие преобразователи Холла?
17. Как осуществляется измерение мощности с преобразователями Холла?
18. Как работают ваттметры на основе эффекта «горячих» носителей тока?
19. Какие методы используются при измерениях мощности и энергии лазерного излучения?
20. Объяснить принцип действия цифрового ваттметра по его упрощенной структурной схеме.

Глава 11. АНАЛИЗ СПЕКТРА СИГНАЛОВ

В радиотехнических устройствах протекают электрические процессы, имеющие специфический характер. Реальный радиотехнический сигнал как физический объект аналитического и практического исследований достаточно сложен. Чтобы произвести анализ прохождения сигнала через радиотехнические цепи, необходимо его представить в удобной математической форме. В теории сигналов широкое применение нашли два способа математического и физического представления электрических сигналов: временной и спектральный. Такое представление возможно вследствие *принципа дуальности* (двойственности, взаимосвязи) частоты и времени, поскольку $f = 1/t$. При временном способе анализа сигнал отражается непрерывной функцией времени или совокупностью элементарных импульсов, следующих друг за другом через определенные интервалы времени. Спектральный способ основан на представлении (аппроксимации, декомпозиции) сигнала в виде суммы гармонических составляющих разных, обычно кратных друг другу частот.

Процессы в электрических цепях получаются тем сложнее, чем более сложной является форма сигналов. В этих случаях часто становится эффективным и полезным спектральное представление сигналов.

11.1. Общие сведения

Фундаментальная идея спектрального представления сигналов восходит к временам более чем 200-летней давности и принадлежит знаменитому французскому физiku и математику Фурье. В начале XIX в. Фурье удалось доказать оригинальную теорему, в которой он показал, что любое изменение во времени некоторой периодической функции можно представить в виде конечной или бесконечной суммы ряда гармонических колебаний с разными амплитудами, частотами и начальными фазами. В радиотехнике этой функцией может быть, в частности, ток или напряжение в некоторой электрической цепи.

Столь простое представление сложного изменения во времени какой-либо физической величины (в данном случае электрического сигнала) в виде суммы ряда простейших гармонических колебаний могло показаться на первый взгляд математическим трюком. Но это не трюк. Несложный пример доказательства рассуждений Фурье показан на рис. 11.1.

Пусть периодическая, достаточно сложная по форме кривая напряжения $u(t)$ (рис. 11.1, а), — это сумма двух синусоид равной амплитуды, но разных частот и

начальных фаз (рис. 11.1, б): основной $u_1(t)$ (первой гармоники) и удвоенной $u_2(t)$ по отношению к ней частоты (рис. 11.1, в).

Для периодических сигналов Фурье ввел разложение по различным видам рядов — тригонометрическим, комплексным и т.д., например по формулам (4.4), (4,7). Фурье также доказал, что непериодические (импульсные) сигналы можно описать с помощью двух его преобразований — прямого и обратного.

Итак, практически любой сигнал можно представить в виде суммы гармонических составляющих, амплитуды и частоты которых могут быть определены с помощью прямого преобразования Фурье. Этот спектр гармонических составляющих можно изобразить графически, если по оси абсцисс откладывать обозначение частот, а по оси ординат — величины амплитуд гармоник. На рис. 11.2 наглядно показано временное и спектральное представление достаточно сложного по форме сигнала.

Анализ спектра включает измерение как амплитуд гармоник — спектр амплитуд, так и их начальных фаз — спектр фаз. Однако для многих практических задач достаточно знать лишь спектр амплитуд. Поэтому под анализом спектров обычно понимают нахождение спектра амплитуд исследуемого сигнала.

Автоматическое представление спектра сигналов осуществляется специальными приборами — *анализаторами спектра*.

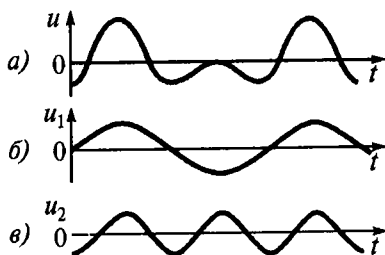


Рис. 11.1. К анализу Фурье:
а — сложное колебание; б, в — первый и второй суммируемые сигналы

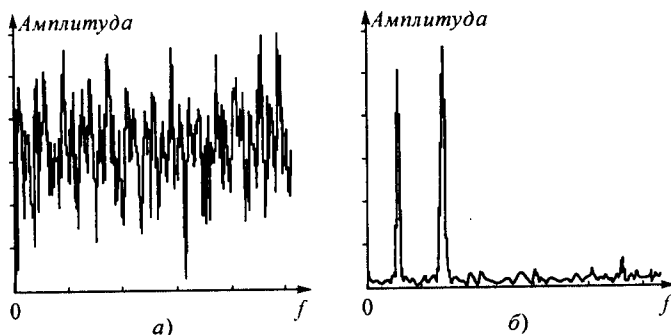


Рис. 11.2. Представление сигнала:
а — временная диаграмма; б — спектр

Анализаторы спектра электрических сигналов можно классифицировать по ряду специфических признаков:

- по способу анализа — последовательные, параллельные (одновременные) и смешанные;
- по типу индикаторного устройства — осциллографические, с самописцем;
- по диапазону частот — низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные, широкодиапазонные.

Большинство отечественных анализаторов спектра имеет обозначение С4 —.... Основными метрологическими характеристиками анализаторов являются: разрешающая способность, время анализа и погрешности измерения частоты и амплитуды. Сущность этих понятий будет объяснена дальше. Отметим лишь, что метрологические характеристики анализатора определяются его схемой.

Для спектрального анализа непериодических сигналов (функций) используют аппарат интегрального преобразования Фурье. При этом применяется известная формула прямого преобразования Фурье, характеризующая спектральную плотность непериодического (импульсного) сигнала:

$$S(j\omega) = S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (11.1)$$

Однако есть одно обстоятельство, общее для всех схем анализаторов, ограничивающее точность анализа спектра сигнала. Преобразование Фурье широко применяют при аналитических исследованиях физических процессов, если выполняются условия Дирихле и абсолютной интегрируемости. Для реальных физических процессов эти условия обычно выполняются.

Преобразования Фурье предполагают, что процесс $u(t)$ задан на всей оси времени от $-\infty$ до $+\infty$. В частности, на интервале времени от $-\infty$ до t_1 и от t_2 до $+\infty$ считают $u(t) = 0$. Такая модель соответствует понятию конечности во времени процесса, преобразуемого по Фурье. Спектр (11.1) определяется всем закончившимся процессом, является функционалом всего процесса. Однако при измерениях наблюдают процессы на конечном интервале времени T_a (времени анализа, наблюдения), т.е. не закончившиеся во времени. Это несоответствие позволяет устранить модель текущего частотного спектра, определяемого соотношением

$$S(j\omega, T_a) = S(\omega, T_a) = \int_0^{T_a} u(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (11.2)$$

Иными словами, текущая спектральная плотность зависит от времени анализа и форма текущего спектра в общем случае отличается от истинного тем больше, чем меньше T_a .

Отличие текущего спектра от спектра закончившегося процесса зависит от того, проявились ли за время анализа T_a все характерные особенности

сигнала. Если исследуемый анализатором сигнал периодический с периодом следования T , то необходимо, чтобы $T_a \gg T$.

При измерении спектра нижний предел является конечным, т.е. интегрирование (усреднение) производится в интервале от 0 до T_a . За счет этого возникает погрешность определения составляющих спектра, связанная с методом измерений, т.е. методическая погрешность. Эта погрешность для ряда технических применений не играет особой роли, в других случаях ее необходимо учитывать и исследовать.

Практически все приборы, применяемые для анализа спектра сигналов, можно условно разделить на аналоговые и цифровые. Несмотря на многие достоинства и возможности цифровых анализаторов, аналоговые анализаторы еще широко применяются, особенно в верхней части высокочастотного и СВЧ диапазонов. Вместе с тем современные аналоговые анализаторы спектров содержат и цифровые устройства.

Практически во всех аналоговых анализаторах выделение гармонических составляющих сигнала производится узкополосными фильтрами. Этот метод реализуется двумя способами: *параллельного* и *последовательного* анализа сигнала. Основной элемент таких приборов — полосовой фильтр (высокодобротный резонатор) с узкой полосой пропускания, служащий для выделения отдельных составляющих или узких диапазонов исследуемого спектра.

11.2. Параллельный анализ спектра

Анализаторы такого типа применяют в основном для анализа спектров одиночных импульсных сигналов. При параллельном анализе спектра сигнала применяют n полосовых фильтров Φ , каждый из которых настроен на определенную частоту (рис. 11.3, а).

Исследуемый сигнал $u(t)$, спектр которого расположен в полосе частот Δf_n (рис. 11.3, б) подается одновременно на все фильтры. Фильтры имеют иден-

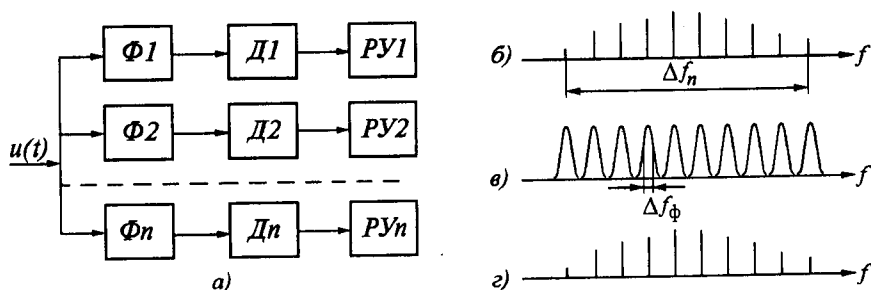


Рис. 11.3. Параллельный анализ спектра:

а — структурная схема анализатора; б — исследуемый спектр;
в — АЧХ фильтров; г — спектр на выходе анализатора

точные АЧХ с одинаковыми полосами пропускания Δf_ϕ и настроены на определенные частоты (рис. 11.3, в). Сигналы на выходе фильтров определяются составляющими спектра анализируемого процесса (рис. 11.3, з). Далее спектральные составляющие, после детектирования в детекторах D , поступают на регистрирующие устройства (РУ).

Полоса пропускания фильтра определяет статическую разрешающую способность анализатора (при условии время анализа $T_a \rightarrow \infty$, т. е. T_a — велико). *Разрешающая способность* анализатора — способность различать составляющие спектра с близкими частотами. Чем уже полоса пропускания фильтра, тем выше разрешающая способность. При широкой полосе пропускания несколько составляющих не будут разделяться. Если оценивать разрешающую способность полосой частот Δf_p , при которой возможно разделение ближайших составляющих, то при идеальной прямоугольной АЧХ фильтра можно полагать $\Delta f_p = \Delta f_\phi$. Для реальных фильтров $\Delta f_p = 2\Delta f_\phi$. Если время анализа T_a мало, то имеет место *динамическая разрешающая способность*.

Необходимое время анализа для правильного воспроизведения спектра можно приблизительно оценить следующим образом. Время анализа при параллельном исследовании может быть принято примерно равным τ_y — времени установления напряжения на выходе фильтра с прямоугольной частотной характеристикой и рабочей полосой Δf_ϕ (от уровня 0,1 до уровня 0,9 от установившегося значения). Из теории фильтров известно, что время установления $\tau_y = 0,86/(\Delta f_\phi)$, следовательно, $T_a \approx \tau_y = 1/(\Delta f_\phi)$.

Скорость параллельного анализа

$$v = \frac{\Delta f_n}{T_a} = \frac{n(\Delta f_\phi)}{1/(\Delta f_\phi)} = n(\Delta f_\phi)^2. \quad (11.3)$$

Скорость анализа резко снижается при сужении полосы пропускания фильтра. К достоинству анализаторов параллельного действия относится малое время анализа.

Погрешность при параллельном анализе определяют следующие основные факторы: конечность времени установления колебаний на выходе фильтра и зависимость ее от полосы пропускания, различие характеристик фильтров, настроенных на разные частоты.

11.3. Последовательный анализ спектра

Для исследования спектров многократно повторяющихся процессов чаще всего применяют последовательный анализ. На рис. 11.4 показана упрощенная структурная схема анализатора спектра последовательного типа.

Анализатор состоит из супергетеродинного приемника, индикаторного (чаще осциллографического) устройства и калибратора. Супергетеродинный

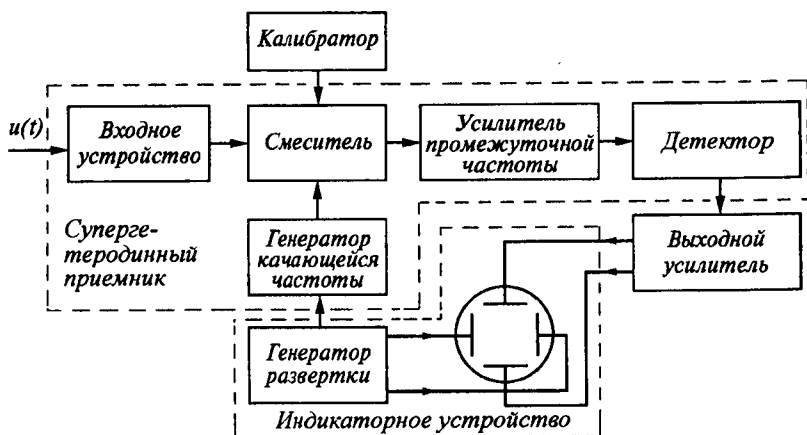


Рис. 11.4. Структурная схема анализатора спектра последовательного типа

приемник служит для последовательного во времени выделения гармонических составляющих спектра входного сигнала. Приемник содержит входное устройство, смеситель, генератор качающейся частоты (ГКЧ), усилитель промежуточной частоты (УПЧ) и детектор. К приемнику можно отнести и выходной усилитель. Настройку приемника на разные частоты производят с помощью напряжения, поступающего с выхода генератора развертки.

Индикаторное устройство предназначено для наблюдения спектра исследуемого процесса и построено по принципу электронного осциллографа. Оно содержит электронно-лучевую трубку и генератор развертки. В качестве индикатора применяют различные газоразрядные и плазменные панели. Калибратор используют для измерения характерных параметров спектра: частот, соответствующих максимумам или нулевым значениям огибающей спектра, ширины главного и боковых лепестков и т. д.

Рассмотрим процессы, протекающие в анализаторе спектра (рис. 11.5). Входной сигнал $u(t)$ подается на смеситель через входное устройство. На второй вход смесителя поступает сигнал от генератора качающейся частоты. На рис. 11.5, а, б показаны соответственно изменение во времени частоты ГКЧ (частота $f_{ГКЧ}$ меняется от $f_{\min}$ до $f_{\max}$ в такт с изменением напряжения генератора развертки), форма амплитудно-частотной характеристики УПЧ $u_{УПЧ}$, и диаграмма спектра $S(f)$ исследуемого сигнала (на диаграмме он показан тремя гармоническими составляющими, отражающими однотональное амплитудно-модулированное колебание).

В результате воздействия на смеситель исследуемого сигнала и напряжения ГКЧ составляющие спектра $S(f)$ преобразуются в диапазон промежуточных частот $S(f_{пр})$. Форма спектра сигнала при этом сохраняется. С линейным изменением частоты ГКЧ спектральные составляющие преобразованного

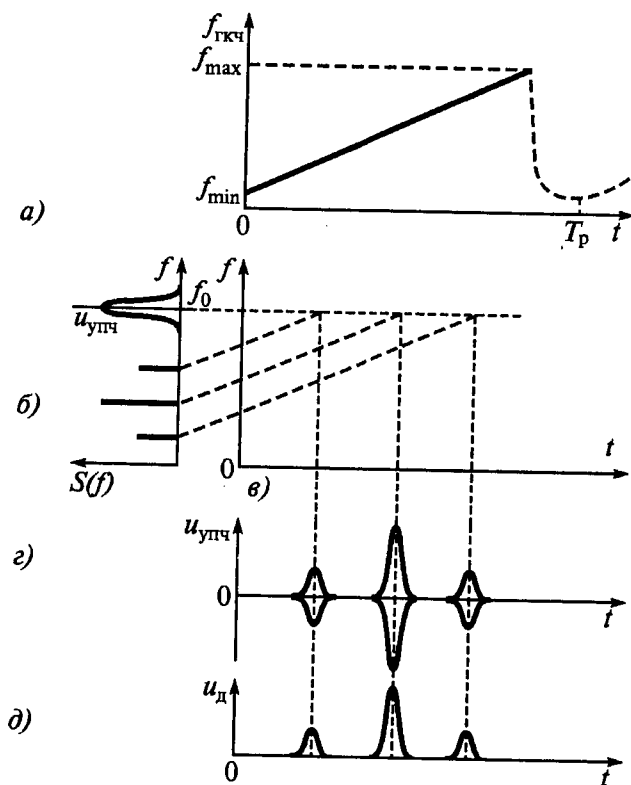


Рис. 11.5. Сигналы в анализаторе спектра последовательного типа:
а — изменение частоты ГКЧ; *б* — исследуемый спектр и АЧХ УПЧ; *в* — линейное изменение частоты во времени; *г* — сигнал на выходе УПЧ; *д* — сигнал на выходе детектора

спектра также линейно изменяются во времени и последовательно попадают в полосу пропускания УПЧ (рис. 11.5, *в*). Напряжение на выходе УПЧ имеет вид радиоимпульсов (рис. 11.5, *г*), амплитуды которых при постоянном напряжении ГКЧ пропорциональны амплитудам составляющих исследуемого спектра.

С выхода УПЧ радиоимпульсы подаются на амплитудный детектор. На выходе детектора возникают видеоимпульсы u_d (рис. 11.5, *д*), поступающие через выходной усилитель на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. На горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ подается пилообразное напряжение генератора развертки, в результате чего на экране осциллографа появляются видеоимпульсы, изображающие спектр исследуемого сигнала в течение одного периода развертки $T_p = T_a$.

Диаграммы на рис. 11.5 построены при условии, что разность частот соседних составляющих спектра много больше полосы пропускания УПЧ, при этом возможна сравнительно малая статическая разрешающая способность (т.е. большой интервал частот Δf_p). На практике допускается некоторое перекрытие изображений гармоник сигналов (рис. 11.6).

Статическую разрешающую способность анализатора спектра последовательного типа определяют по формуле (приведена без вывода):

$$\Delta f_p = \sqrt{3} \Delta f_{\text{упч}}. \quad (11.4)$$

Параметры спектра измеряют вспомогательными устройствами. Положение на оси частот отдельных спектральных составляющих и характерных участков спектра определяют частотными метками. Наиболее просто создается одна частотная метка путем подачи на вход анализатора спектра вместе с исследуемым сигналом напряжения от измерительного генератора синусоидальных колебаний. В этом случае на экране анализатора появится частотная метка — риска, соответствующая частоте сигнала генератора, изменяя частоту которого добиваются совпадения метки с определяемой точкой спектра. Частоту затем находят по шкале генератора.

Чтобы создать набор равноотстоящих друг от друга меток, в анализаторах спектра применяют специальные генераторы (например, генераторы частотно-модулированного сигнала). Из радиотехники известно, что спектр частотно-модулированного сигнала состоит из ряда гармонических составляющих, отстоящих друг от друга на частоту модуляции F_m . Предусматривают возможность изменять среднюю частоту колебаний f_{cp} и частоту модуляции F_m . При изменении частоты модуляции меняется интервал между метками, при изменении средней частоты колебаний все метки сдвигаются по оси частот. Напряжение от генератора частотно-модулированных колебаний вместе с исследуемым сигналом подают на вход анализатора спектра. На экране трубки наблюдается картина наложения двух спектров. Изменяя параметры напряжения калибровки (среднюю частоту и частоту модуляции), совмещают метки с характерными точками исследуемого спектра.

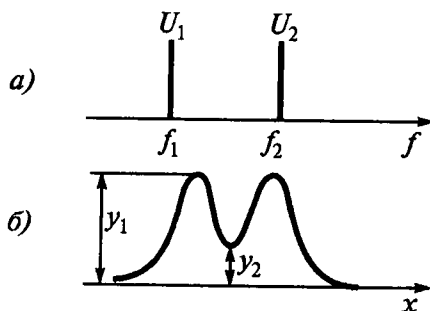


Рис. 11.6. Диаграммы к определению разрешающей способности анализатора спектра: а — спектр сигнала; б — эюпы спектров на экране

Динамическая разрешающая способность анализатора спектра зависит от скорости перестройки частоты ГКЧ. При увеличении скорости перестройки напряжение на выходе УПЧ не успевает изменяться с изменением напряжения на входе, так как энергия, запасенная в избирательной системе (например, в контуре), не может измениться мгновенно. Это явление имеет место в том случае, если длительность переходного процесса в УПЧ соизмерима со временем изменения частоты колебаний на входе и в пределах его полосы пропускания. Динамические искажения изображения спектра ограничивают допустимую скорость изменения частоты ГКЧ. Отсюда время анализа определяется неравенством (для упрощения формула приведена без вывода):

$$T_a > \frac{\Delta f_{\text{ГКЧ}}}{A \Delta f_{\text{УПЧ}}^2}, \quad (11.5)$$

где $\Delta f_{\text{ГКЧ}} \approx f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$; A — коэффициент, определяемый схемой УПЧ и допустимыми динамическими погрешностями.

Используя формулу (11.4) для интервала частот, определяющего статическую разрешающую способность Δf_p , получим время анализа:

$$T_a > 3 \frac{\Delta f_{\text{ГКЧ}}}{A \Delta f_p^2}. \quad (11.6)$$

Отсюда следует, что время анализа обратно пропорционально квадрату разрешающей способности. Чем выше разрешающая способность (меньше Δf_p), тем больше должно быть время анализа. Для повышения разрешающей способности (уменьшения Δf_p) применяют схемы с двойным или тройным преобразованием частоты, которые здесь не рассматриваются.

В настоящее время серийные анализаторы могут обеспечить работу в диапазоне частот от 10 Гц до 40 ГГц с полосой пропускания 0,001...300 кГц и разрешающей способностью 1 кГц на высоких частотах. Погрешность измерения уровней напряжений достигает 5 %.

11.4. Цифровой анализ спектра

Бурное развитие цифровой вычислительной техники дало толчок для создания цифровых анализаторов спектра. Цифровой метод анализа спектра состоит в преобразовании исследуемого сигнала в цифровой код и вычислении составляющих спектра с помощью специализированных микропроцессоров. Цифровые анализаторы спектра по совокупности дискретных отсчетов (выборки) аналогового сигнала вычисляют спектральную плотность (11.1) путем замены интеграла на конечную сумму из некоторого числа выборок. Такие вычисления осуществляются с помощью алгоритмов дискретного и быстрого преобразований Фурье.

Алгоритм дискретного преобразования Фурье

Если сигнал $u(t)$ со спектральной плотностью $S(\omega)$ (рис. 11.7, а, б), являющийся непрерывной функцией времени в некотором ограниченном интервале $0 \dots T_n$, дискретизирован в соответствии с теоремой Котельникова и отражен своими N отсчетами $\{u(k\Delta t)\} = \{u_k\}$ с частотой дискретизации $\omega_n = 2\pi/T_n = 2\pi/(N\Delta t)$, то его можно представить в виде дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

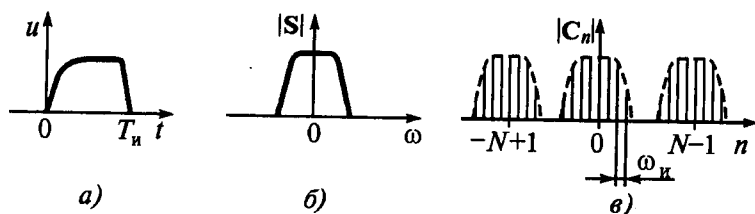


Рис. 11.7. Представление аналогового сигнала дискретным преобразованием Фурье: а — сигнал; б — спектр сигнала; в — ДПФ сигнала

Спектр процесса, полученный численными методами в виде конечных сумм дискретных решетчатых функций (ДПФ), отличается от спектра, вычисленного интегральными преобразованиями (11.2). Спектр ДПФ непрерывного сигнала периодически размножен: повторяется по оси частот с периодом, равным частоте следования отсчетов. Алгоритм дискретного преобразования Фурье имеет вид:

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k e^{-j2\pi nk/N}, \quad (11.7)$$

где C_n — комплексные гармонические составляющие исследуемого спектра; $N = T_n/\Delta t$ — необходимое число отсчетов, отвечающих требованиям теоремы Котельникова; $n = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$ — номер спектральной составляющей.

Это фундаментальное для дискретных сигналов соотношение показано графически на рис. 11.6, в. Дискретное преобразование Фурье по существу представляет собой алгоритм цифрового вычисления гармонических составляющих спектра C_n по заданным дискретным отсчетам u_k аналогового сигнала $u(t)$, что значительно сокращает время и объем обработки.

Быстрое преобразование Фурье

Большое время вычислений спектра препятствовало распространению цифровых методов спектрального анализа. Многократно сократить число операций позволяет *быстрое преобразование Фурье* (БПФ), обеспечивающее более скоростное и эффективное цифровое вычисление ДПФ. В основу алгоритма положен принцип разбиения (прореживания во времени, или децима-

ции — от греч. *деци* — доля) заданной последовательности отсчетов дискретного сигнала на ряд промежуточных последовательностей (подпоследовательностей). При этом число дискретов N разделяют на множители (например, $N = 8 = 2 \cdot 2 \cdot 2$, $N = 60 = 3 \cdot 4 \cdot 5$). Затем определяют спектры этих промежуточных последовательностей и через них находят спектр всего сигнала. В зависимости от состава, числа и порядка следования множеств можно создать различные алгоритмы БПФ. В цифровой технике удобнее обрабатывать сигнальные последовательности с числом отсчетов N , являющимися степенью с основанием два (4, 8, 16 и т.д.). Это позволяет многократно делить входную последовательность отсчетов на более мелкие подпоследовательности.

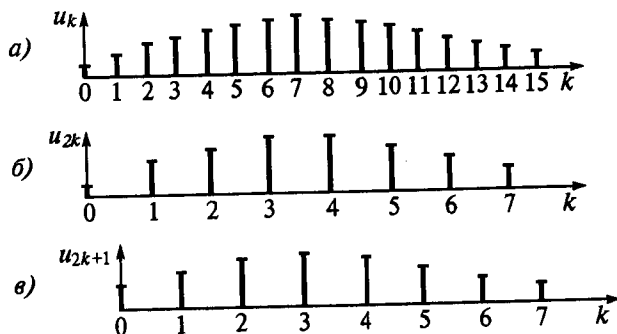


Рис. 11.8. Последовательности и подпоследовательности сигнала:
а — входная; б — с четными номерами; в — с нечетными номерами

Пусть требуется вычислить ДПФ входной последовательности дискретного сигнала $\{u(k\Delta t)\} = \{u_k\}$, имеющей четное число отсчетов (рис. 11.8, а), причем $N = 2^r$, где r — целое число (если это условие не выполняется, то последовательность искусственно дополняют нулями до требуемого значения N). Представим входную последовательность в виде двух подпоследовательностей с четными и нечетными номерами и половинным числом членов в каждой (рис. 11.8, б, в):

$$u_{\text{чт}} = u_{2k}; \quad u_{\text{нч}} = u_{2k+1}; \quad k = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1. \quad (11.8)$$

Коэффициенты ДПФ для подпоследовательностей с четными и нечетными номерами запишем отдельно:

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} u_{2k} e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} u_{2k} e^{-\frac{j2\pi nk}{N/2}} = C_{\text{нчт}}; \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} u_{2k+1} e^{-\frac{j2\pi n(2k+1)}{N}} &= \frac{1}{N} e^{-\frac{j2\pi n}{N}} \sum_{k=0}^{N/2-1} u_{2k+1} e^{-\frac{j2\pi nk}{N/2}} = e^{-\frac{j2\pi n}{N}} C_{\text{нчн}}. \end{aligned} \quad (11.9)$$

Коэффициенты C_n результирующего ДПФ входной последовательности можно выразить через параметры $C_{n \text{ чет}}$ и $C_{n \text{ неч}}$ двух вновь введенных подпоследовательностей. Из последней формулы нетрудно заметить, что в диапазоне номеров отсчетов от 0 до $N/2-1$, ДПФ входной последовательности определяется соотношением

$$C_n = C_{n \text{ чет}} + e^{-j2\pi n/N} C_{n \text{ неч}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1. \quad (11.10)$$

Так как ДПФ четной и нечетной подпоследовательностей являются периодическими, имеющими период следования $N/2$, то:

$$C_{n \text{ чет}} = C_{(n + N/2) \text{ чет}}, \quad C_{n \text{ неч}} = C_{(n + N/2) \text{ неч}}.$$

Запишем экспоненциальный множитель в формуле (11.10) при $n = N/2$, т.е. для ДПФ $C_{(N/2 + n) \text{ неч}}$ в виде:

$$e^{-j \frac{2\pi(N/2+n)}{N}} = e^{-j\pi} e^{-j \frac{2\pi n}{N}} = -e^{-j \frac{2\pi n}{N}}.$$

С учетом двух последних выражений находим ДПФ входной последовательности для отсчетов с номерами от $N/2$ до $N-1$:

$$C_{N/2 + n} = C_{n \text{ чет}} - e^{-j2\pi n/N} C_{n \text{ неч}}; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1. \quad (11.11)$$

Соотношения (11.10) и (11.11) представляют алгоритмы БПФ. Отметим, что экспоненциальные фазовые множители $e^{-j2\pi n/N}$ в этих алгоритмах учитывают влияние сдвига нечетной подпоследовательности относительно четной.

Чтобы еще уменьшить число вычислений, четную и нечетную подпоследовательности также разбивают на две промежуточные части. Разбиение продолжают вплоть до получения простейших двухэлементных последовательностей. Определив ДПФ данных простейших пар отсчетов, можно вычислить ДПФ четырехэлементных, восьмиэлементных и так далее подпоследовательностей. При объединении ДПФ четной и нечетной подпоследовательностей используют алгоритмы (11.10) и (11.11), подставляя в них соответствующие значения номеров N и n .

Можно заметить, что вычисление по формулам (11.9) не потребует операций умножения, а только сложение и вычитание комплексных чисел. Учитываться же должны лишь операции умножения в алгоритмах (11.10) и (11.11) для различных n при разбиениях массива отсчетов на мелкие подпоследовательности. Число этих операций при первом разбиении составляло $N/2$. Тоже же число $N/2$ операций требуется выполнить при каждом следующем разбиении. Итак, вдвое увеличивается число подпоследовательностей и вдвое сокращается наибольшее число n в формулах (11.10) и (11.11).

Вычисление коэффициентов ДПФ последовательности из N отсчетов по алгоритмам БПФ требует совершения примерно $M \log_2 N$ операций умножения. Алгоритмы БПФ сокращают число операций по сравнению с алгоритмами ДПФ в $N^2/(N \log_2 N) = N/(\log_2 N)$ раз. В частности, при количестве от-

счетов $N = 2^{10}$, имеем $\log_2 N = 10$ и сокращение числа операций составляет $N/(\log_2 N) \approx 100$. При очень больших массивах отсчетов входного сигнала выигрыш в скорости обработки может достигать нескольких тысяч.

Упрощенная структурная схема цифрового анализатора спектра, реализующая один из алгоритмов БПФ, показана на рис. 11.9.

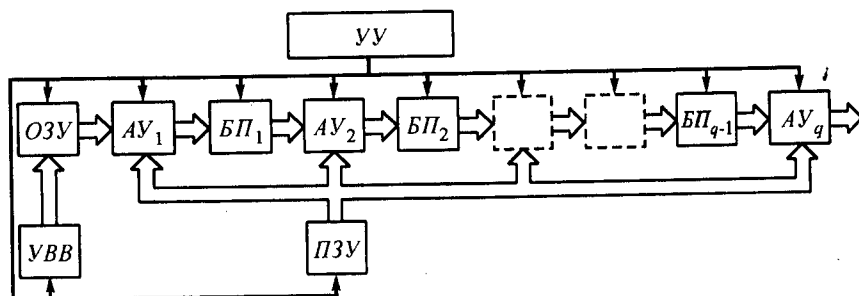


Рис. 11.9. Структурная схема анализатора с реализацией БПФ

В схеме используются процессоры БПФ с каскадной структурой организации параллельной работы и содержатся $q = \log_2 N$ арифметических устройств ($АУ_i$), а также $q - 1$ блоков памяти ($БП_i$) емкостью 2^i комплексных слов каждый. В режиме реального времени все N отсчетов обрабатываемой группы через устройство ввода-вывода информации (УВВ) поступает в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Последним тактом ввода группы отсчетов к ОЗУ последовательно подключаются арифметические устройства, которые осуществляют обработку информации в соответствии с заданным алгоритмом БПФ. Служебная информация о комплексных весовых коэффициентах $\exp(-j2\pi nk/N)$ вводится в арифметические устройства из постоянного запоминающего устройства (ПЗУ).

Вывод результатов обработки осуществляется непосредственно из $АУ$. Синхронизация работы всех устройств цифрового анализатора спектра выполняется командами, вырабатываемыми устройством управления (УУ).

Цифровые анализаторы спектра

Современный цифровой анализатор представляет собой качественно новый тип аппаратуры, в которой специфические функции многочисленных приборов моделируются с помощью набора компьютерных программ: для изменения характера функционирования достаточно вызвать соответствующую программу обработки без аппаратурной перестройки устройств. Комплекс программ современного цифрового анализатора спектра позволяет сочетать в одном приборе практически все функциональные возможности, необходимые для всестороннего исследования параметров различных сигналов и процессов.

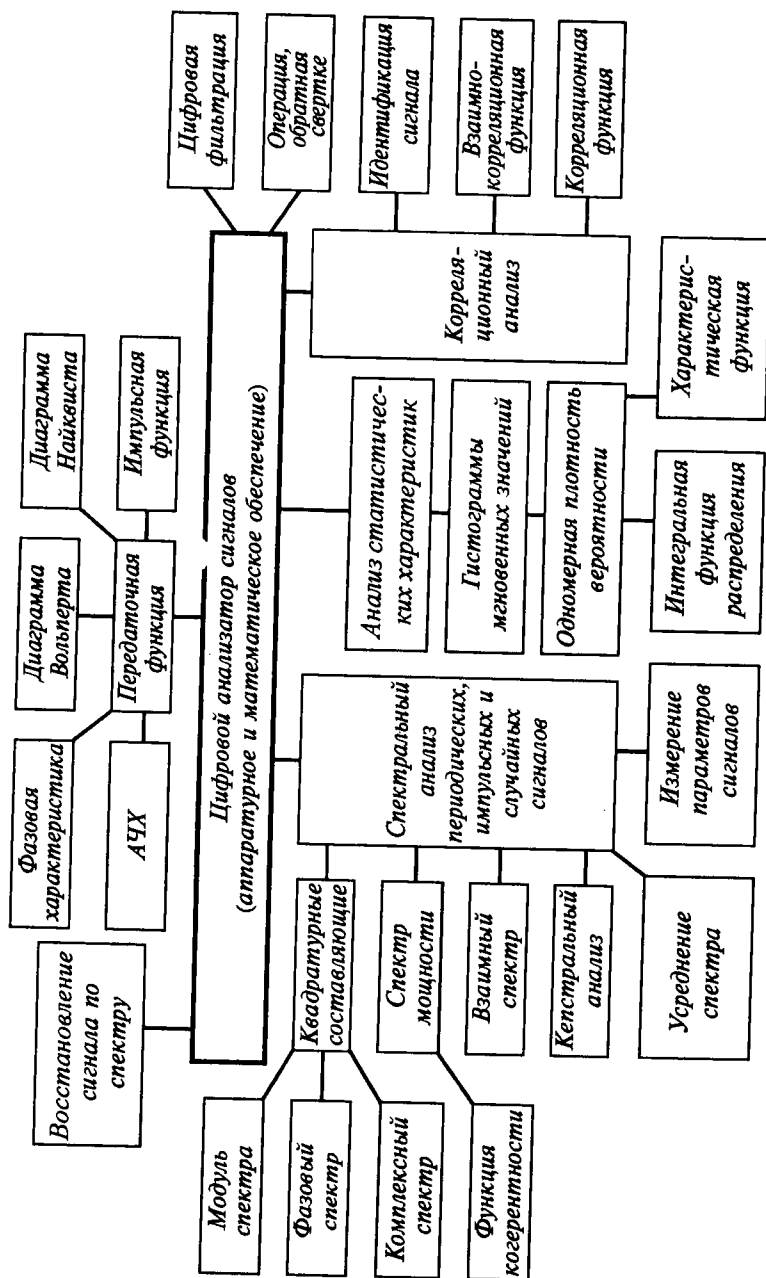


Рис. 11.10. Функциональные возможности современного цифрового анализатора спектра

Принцип действия цифрового анализатора спектра основан на вычислительных процедурах определения параметров и характеристик различных сигналов и процессов. В функциональные возможности современного цифрового анализатора (рис. 11.10) заложены следующие алгоритмы:

- восстановление сигнала по его спектру, т.е. вычисление обратного преобразования Фурье;

- анализ и синтез характеристик электрических цепей: определение импульсных (реакция цепи на элементарные сигналы), передаточных и фазовых характеристик цепей с сосредоточенными параметрами (постоянными); анализ диаграмм Вольперта-Смитта (характеристики и параметры цепей с распределенными постоянными); устойчивость цепей со звеньями обратных связей — анализ диаграммы (критерия устойчивости) Найквиста;

- цифровая обработка и фильтрация сигналов и вычисление произведения спектров (операция, обратная свертке);

- корреляционный анализ детерминированных и случайных сигналов: вычисление корреляционных и взаимокорреляционных функций; определение фазовых соотношений сигналов (идентификация сигналов);

- спектральный анализ периодических, импульсных и случайных сигналов: анализ квадратурных составляющих — определение модуля спектра, фазового спектра, комплексного спектра; определение спектра мощности случайного процесса и его функции когерентности; вычисление взаимного спектра; усреднение спектра по полосе частот; определение кепстра сигналов — так называемый обобщенный или гомоморфный (гомоморфизм — неоднозначность) линейный анализ мультипликативных сигналов;

- измерение параметров сигналов (амплитуды, частоты, фазы, коэффициента или индекса модуляции, девиации (отклонения) частоты сигналов; определение параметров импульсных сигналов — амплитуды, длительности, длительностей переднего и заднего фронтов, периода следования и т.д.);

- анализ статистических характеристик случайных процессов; построение гистограмм (столбчатых распределений величин) мгновенных значений сигналов; определение одномерной плотности вероятности и интегральной функции распределения случайных процессов, характеристической функции.

Структурная схема современного цифрового анализатора спектра приведена на рис. 11.11.

Исследуемые аналоговые сигналы по одному (A) или двум (A , B) каналам подаются на соответствующие усилители с переменным коэффициентом усиления, которые приводят различные уровни входных сигналов (от 0,01 до 10 В) к стандартному значению, необходимому для нормальной работы последующих трактов. Затем сигналы поступают на ФНЧ, в котором выделяется полоса частот, подлежащая анализу. По команде исследователя фильтр может быть выключен. С выхода фильтров сигналы поступают на АЦП, где они преобразуются в параллельный десятиразрядный двоичный код. Возможна

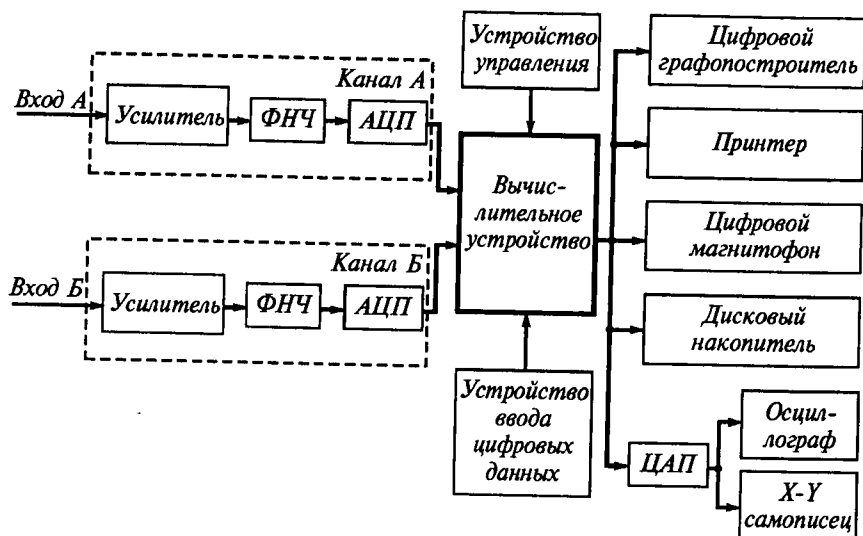


Рис. 11.11. Структурная схема современного цифрового анализатора

работа как одного, так и обоих каналов. В последнем случае выборки мгновенных значений сигнала проходят одновременно по обоим каналам, что позволяет сохранить в цифровом коде информацию о фазовых соотношениях сигналов, необходимую для измерения взаимных характеристик.

Частота выборки определяется кварцевым генератором и может изменяться исследователем в пределах $0,2 \dots 100$ кГц. Эта частота определяет отсчетный масштаб прибора во временной и частотной областях.

Тракт прохождения исследуемого сигнала от входа усилителей до выхода АЦП имеет калиброванные значения коэффициента передачи во всем диапазоне частот и уровней напряжений. Информация о значении коэффициента передачи и частота выборки вводятся в цифровое вычислительное устройство (микропроцессор) и учитываются при формировании конечного результата. Микропроцессор работает в соответствии с заложенной в него программой. Программа состоит из ряда подпрограмм, организующих ту или иную вычислительную операцию (вычисление спектра, корреляционной функции, построение гистограммы и т.д.). Вызов необходимой подпрограммы осуществляется с устройства управления. Результаты вычислений выводятся на индикаторное или регистрирующее устройство, в качестве которого может быть использован цифровой графопостроитель, принтер, цифровой магнитофон, дисковый накопитель, осциллограф или самописец. Отметим, что последние два подключаются через ЦАП. Все результаты сопровождаются масштабным коэффициентом для перевода их в физические единицы.

При анализе сигналов, представленных в цифровом виде (в виде числового ряда), данные вводятся непосредственно в цифровое вычислительное устройство с помощью устройства ввода цифровых данных с наборного табло пульта управления в десятичном коде.

Основные режимы работы цифрового анализатора спектра:

- спектральный, статистический и корреляционный анализ;
- измерение амплитудного и фазового спектров;
- измерение передаточных функций электрических сигналов;
- измерение свертки двух сигналов;
- измерение спектра мощности, взаимного спектра;
- измерение корреляционных функций;
- измерение гистограмм амплитуд.

11.5. Анализаторы спектра на цифровых фильтрах

Внедрение цифровых методов обработки сигналов в измерительной технике привело к созданию эффективных и высокоскоростных анализаторов спектра на цифровых фильтрах. Цифровой фильтр имеет стабильную частотную характеристику, не нуждается в подстройке, компенсирующей неточности из-за старения элементов и его универсальность намного выше аналогового фильтра. При перестройке цифрового фильтра нет необходимости менять элементы, а достаточно его перепрограммировать. Однако главное преимущество цифровой фильтрации в измерительной технике — применение высокоточных цифровых детекторов и устройств усреднения (цифровых интеграторов). Цифровой детектор измеряет практически истинное среднее квадратическое значение анализируемого сигнала без ограничений, связанных с его амплитудным значением.

Цифровое устройство усреднения, обеспечивающее усреднение анализируемого сигнала по линейному и экспоненциальному (или показательному) законам, отличается универсальностью и эффективностью, недостижимым для аналоговых усредняющих устройств.

Цифровая обработка сигналов в анализаторах спектров

Одним из важнейших методов цифровой обработки сигналов в современной измерительной технике и, в частности, в анализаторах спектров, является цифровая фильтрация. Она заключается в цифровом преобразовании последовательности числовых отсчетов входного сигнала $\{u(k\Delta t)\} = \{u_k\}$ в последовательность числовых отсчетов $\{y(k\Delta t)\} = \{y_k\}$ выходного сигнала.

Рассмотрим упрощенную структурную схему цифровой обработки сигналов (рис. 11.12). Непрерывный сигнал $u_{\text{вх}}(t) = u_{\text{вх}}$ (далее аргумент t опущен) поступает на вход АЦП, на выходе которого создается цифровой код в виде двоичного числа $\{u(k\Delta t)\} = \{u_T\} = u_T$ с фиксированным количеством разрядов, соответствующий дискретным отсчетам входного сигнала.

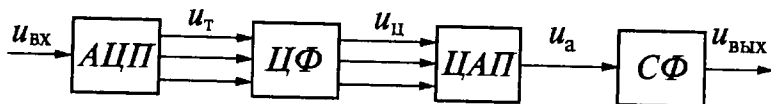


Рис. 11.12. Упрощенная структурная схема цифровой обработки сигналов

Последовательность закодированных определенными цифрами отсчетов $\{u_T\}$ поступает в цифровой фильтр (ЦФ), представляющий собой, по сути дела, специализированный микрокомпьютер (раннее название — спецвычислитель). В цифровом фильтре осуществляется цифровая обработка сигнала в соответствии с определенным алгоритмом, в результате чего на его выходе появляются новые цифровые коды $\{u(k\Delta t)\} = \{u_c\} = u_c$, соответствующие профильтрованному входному сигналу.

Обычно обрабатываемый сигнал с цифрового фильтра поступает на ЦАП, в котором цифровая форма сигнала преобразуется в аналоговую $u_a(t) = u_a$. Однако в измерительной технике часто используется преобразованный сигнал непосредственно в цифровой форме и при этом необходимость в ЦАП отпадает. Если же ЦАП включен в схему обработки, то на его выходе необходим синтезирующий фильтр (СФ) низкой частоты (по существу это ФНЧ), который будет производить сглаживание полученного аналогового сигнала. В результате сглаживания форма кривой выходного сигнала $u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{вых}}$ становится плавной, а не ступенчатой.

Структурные схемы линейных цифровых фильтров

Цифровые фильтры делятся на два больших класса: *нерекурсивные* и *рекурсивные*. Термин *рекурсивный* связан с известным математическим приемом — *рекурсией* — циклическим обращением к вычисленным данным, полученным на предыдущих этапах математических операций.

Нерекурсивные цифровые фильтры. В нерекурсивных, или *трансверсальных* (от англ. *transverse* — *поперечный* — с точки зрения структуры их графического построения) цифровых фильтрах отклик зависит только от значений входной последовательности, и для формирования k -го выходного отсчета используются лишь предыдущие значения входных отсчетов. Такие фильтры обрабатывают входной дискретный сигнал $\{u_k\}$ в соответствии с алгоритмом:

$$y_k = a_0 u_k + a_1 u_{k-1} + a_2 u_{k-2} + \dots + a_m u_{k-m}, \quad (11.12)$$

где y_k — выходной сигнал; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ — действительные постоянные (*весовые*) коэффициенты; m — *порядок* нерекурсивного фильтра, т.е. максимальное число запоминаемых чисел.

Аналитическую сторону алгоритма обработки (11.12) наглядно характеризует структурная схема цифрового фильтра, представленная на рис. 11.13.

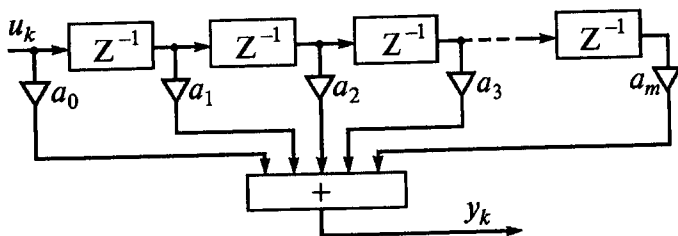


Рис. 11.13. Структурная схема нерекурсивного цифрового фильтра

Основой любого цифрового фильтра являются элементы задержки входной цифровой последовательности $\{u_k\}$ на интервал дискретизации Z^{-1} (задержка сигнала на интервал Δt в общепринятых символах известного в математике z -преобразования), а также масштабные (весовые) блоки a_m , выполняющие в цифровой форме операции умножения на соответствующие коэффициенты. Часто, и по существу, элементы задержки называют ячейками памяти. Сигналы с масштабных блоков поступают в сумматор (+), на выходе которого образуется последовательность отсчетов выходного сигнала $\{y_k\}$.

Не проводя подробного анализа, отметим, что коэффициенты $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ совпадают с соответствующими отсчетами, так называемой импульсной характеристики цифрового фильтра $h_0, h_1, h_2, \dots, h_m$.

Рекурсивные цифровые фильтры. Возможности нерекурсивного цифрового фильтра существенно расширяются при введении в его схему обратных связей, которые позволяют формировать k -й выходной отсчет путем использования предыдущих значений как входного, так и выходного дискретных (выраженных в цифровой форме) сигналов

$$y_k = a_0 u_k + a_1 u_{k-1} + a_2 u_{k-2} + \dots + a_m u_{k-m} + b_1 y_{k-1} + b_2 y_{k-2} + \dots + b_n y_{k-n}. \quad (11.13)$$

Здесь постоянные коэффициенты $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$, как и в алгоритме обработки (11.12), характеризуют нерекурсивную часть, а коэффициенты $b_1, b_2, \dots, b_n$ — рекурсивную часть алгоритма цифровой фильтрации, причем последние не равны нулю одновременно. Порядок такого цифрового фильтра определяется коэффициентом m нерекурсивной части алгоритма обработки. Структурная схема цифрового рекурсивного фильтра показана на рис. 11.14.

На цифровых фильтрах можно создавать различные анализаторы спектра сигналов, в частности, и последовательного, и параллельного методов анализа.

11.6. Измерение нелинейных искажений

Измерение ряда величин, характеризующих параметры сигналов или электрических цепей, осуществляют с помощью приборов, которые по построению аналогичны анализаторам спектра. К таким характеристикам отно-

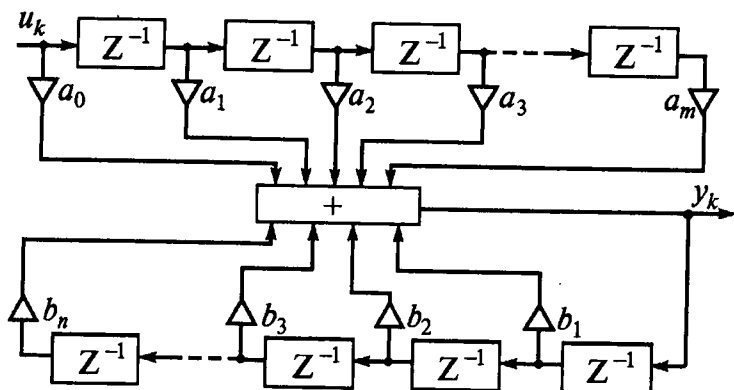


Рис. 11.14. Структурная схема рекурсивного цифрового фильтра

ются нелинейные искажения, которые возникают в цепях с нелинейной амплитудной характеристикой. При прохождении по таким цепям колебания теряют синусоидальную форму (искажаются) и в их спектре появляются высшие гармоники.

Возникающие при нелинейных искажениях гармоники можно исследовать и измерить с помощью анализаторов спектра. Известны несколько количественных показателей уровня нелинейных искажений. Наибольшее распространение получил такой показатель как коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник), представляющий собой отношение среднего квадратического значения всех высших гармоник напряжения (или тока)

$$U_r = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} \quad (11.14)$$

к среднему квадратическому значению его первой гармоники U_1 :

$$K_r = \frac{U_r}{U_1}. \quad (11.15)$$

Для измерения относительного значения напряжения гармоник можно использовать анализатор спектра, если его разрешающая способность позволяет наблюдать отдельно спектральные составляющие. Если детектор анализатора линейный, то в формулу (11.15) вместо напряжений $U_1, U_2, \dots, U_n$ можно подставить значения их амплитуд, измеренных на экране анализатора в единицах длины.

Существуют специальные приборы, измеряющие коэффициент нелинейных искажений, называемые *измерителями нелинейных искажений*.

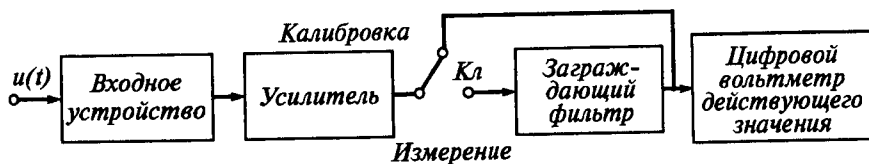


Рис. 11.15. Упрощенная структурная схема аналого-цифрового измерителя нелинейных искажений

Упрощенная структурная схема аналого-цифрового измерителя нелинейных искажений приведена на рис. 11.15.

В основе измерительной методики таких приборов лежит метод подавления основной частоты исследуемого сигнала.

Входное устройство служит для согласования измерительного прибора с источником исследуемого сигнала. Перед измерением переключатель Кл ставят в положение *Калибровка*. Затем с помощью усилителя уровень исследуемого напряжения повышают до такого фиксированного значения, при котором электронный цифровой вольтметр среднего квадратического значения будет проградуирован в величинах коэффициента нелинейных искажений. При этом измеряется среднее квадратическое значение напряжения всего исследуемого сигнала

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}. \quad (11.16)$$

Затем переключатель Кл прибора ставят в положение *Измерение*. Настроив заграждающий фильтр, подавляют напряжение основной частоты (первой гармоники U_1). Полное подавление гармоники U_1 будет при минимальном показании прибора. В этом случае цифровой вольтметр показывает среднее квадратическое значение суммы высших гармонических составляющих сигнала U_r (11.14).

Сравнивая показания во втором и первом случаях, находят коэффициент гармоник

$$K_r = \frac{U_r}{U}. \quad (11.17)$$

Практически при положении переключателя Кл *Измерение* будет измеряться коэффициент K_{r1} . При этом коэффициент гармоник K_r можно вычислить как:

$$K_r = \frac{K_{r1}}{\sqrt{1 - K_{r1}^2}}. \quad (11.18)$$

При небольших нелинейных искажениях исследуемого сигнала ($K_r < 0,1$) коэффициенты K_r и K_{r1} отличаются меньше чем на 1 %. Обычно измерители нелинейных искажений применяются для измерения коэффициента гармоник K_r в пределах 0,1...30 %, в диапазоне частот от 0,01 кГц до 25 МГц и более.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей используется спектральный анализ сигналов?
2. Какой физический смысл лежит в основе прямого и обратного преобразований Фурье?
3. Как аналитически записываются прямое и обратное преобразования Фурье?
4. На чем основан параллельный и последовательный анализ спектра исследуемых сигналов?
5. Какова связь между дискретным преобразованием Фурье и гармоническими составляющими сигнала? Как это используется в цифровых анализаторах?
6. В чем состоит суть быстрого преобразования Фурье?
7. Как выглядит упрощенная структурная схема анализатора параллельного действия?
8. Что называется разрешающей способностью анализатора?
9. Как разрешающая способность связана с полосой пропускания фильтра анализатора?
10. Какова упрощенная структурная схема анализатора спектра последовательного типа?
11. Как связана скорость анализа с полосой пропускания анализатора?
12. Чему равно время анализа в схемах последовательного типа?
13. На чем основан принцип построения гетеродинного анализатора спектра последовательного типа?
14. Каковы основные характеристики гетеродинного анализатора?
15. Какова структура нерекурсивного цифрового фильтра?
16. Как строятся рекурсивные цифровые фильтры?
17. Как записывается математическое выражение для коэффициента гармоник?
18. Каков алгоритм практического определения коэффициента гармоник?

Глава 12. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ

Электрические цепи представляют совокупность соединенных определенным образом источников электрической энергии и нагрузок, по которым протекает постоянный или переменный ток различной частоты (включая токи СВЧ). С точки зрения соотношения размеров цепей и рабочей длины волны электрических колебаний, имеющих в них место, различают цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами (постоянными). Методы измерения параметров элементов электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами существенно различаются.

12.1. Общие сведения

Радиотехнические цепи, размеры которых гораздо меньше рабочей длины волны, называются цепями с *сосредоточенными параметрами*. Свойства данных цепей практически не зависят от конфигурации выводов (электродов) активных и пассивных элементов и размеров соединительных проводов. Радиотехнические цепи, физические размеры которых соизмеримы с рабочей длиной волны колебаний, относятся к цепям с *распределенными параметрами*. Каждый элемент или соединительный провод этой цепи обладает сопротивлением (активными, т.е. невозвратимыми, потерями мощности), индуктивностью и емкостью. Такие цепи называют *длинными линиями* или *СВЧ-трактами*.

Элементы радиотехнической цепи можно соединить в двухполюсники и четырехполюсники (рис. 12.1). *Двухполюсник* (одиночный элемент или слож-

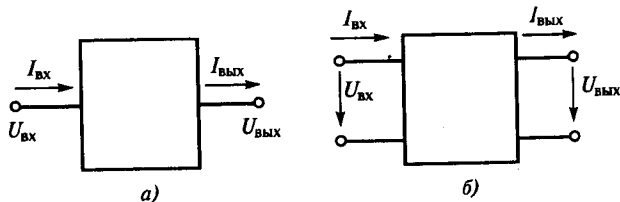


Рис. 12.1. Радиотехнические цепи:
а — двухполюсник; б — четырехполюсник

ная электрическая цепь) имеет два вывода — полюса. *Четырехполюсник* содержит по паре входных и выходных выводов — четыре полюса.

В электрических цепях с сосредото-

ченными параметрами широко применяются линейные компоненты общего назначения: резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы. При определенных допущениях эти элементы можно рассматривать как линейные пассивные двухполюсники, характеризуемые некими идеальными параметрами — сопротивлением R (величина, обратная сопротивлению — проводимость Y), индуктивностью L , емкостью C .

При измерениях не всегда удастся определить значение того или иного параметра, соответствующее идеальному виду элемента. Несовершенство конструкции и характеристик применяемых материалов является причиной появления паразитных параметров элементов. Так, наряду с главным параметром резистора — активным сопротивлением, он имеет и определенную индуктивность; катушка индуктивности, обладая индуктивностью, имеет паразитную емкость и активное сопротивление (сопротивление потерь) и т.д.

С учетом паразитных параметров резистор, конденсатор или катушку индуктивности можно соответственно характеризовать некоторым эффективным значением сопротивления, емкости, индуктивности, которые зависят от частоты. Поэтому эффективные параметры компонентов необходимо измерять на рабочих частотах, если их влиянием на результат измерения нельзя пренебречь. Требуется знать и ряд вторичных параметров этих элементов, например: добротность Q катушки индуктивности, тангенс угла потерь δ конденсатора, характеристическое сопротивление ρ контура, что позволяет более точно определять измеряемые параметры.

Методы измерения электрических параметров цепей с сосредоточенными параметрами очень разнообразны, а приборный состав включает в себя в основном электронные приборы, поэтому обозначение средств измерений может быть различным в зависимости от применяемой системы. Наиболее часто отечественные электронные измерители параметров цепей обозначаются как $E6$ — $E7$. Большая группа приборов (некоторые мосты и измерительные линии) обозначаются буквой « P ».

В зависимости от вида измеряемой величины, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот и других условий для измерения параметров элементов с сосредоточенными постоянными применяют различные методы и средства измерений. Наиболее распространенными методами измерения являются: методы амперметра и вольтметра, мостовой метод, резонансный метод и метод дискретного счета (цифровой метод).

Основными параметрами длинных линий, по аналогии с цепями с сосредоточенными постоянными, являются *погонные* активное сопротивление, индуктивность и емкость. Однако, в отличие от цепей с сосредоточенными постоянными, эти параметры не имеют такого четкого физического смысла и поэтому не измеряются. В то же время основные элементы СВЧ-трактов являются аналогами двух- и четырехполюсников, из которых состоят цепи с сосредоточенными постоянными. Эта аналогия позволяет рассматривать па-

раметры СВЧ-трактов как параметры двух- и четырехполюсников. Приборы, предназначенные для измерения параметров цепей с распределенными постоянными, классифицируют в зависимости от характера конкретных измерений и вида измеряемых величин.

12.2. Измерение активных сопротивлений

Величины измеряемых активных сопротивлений лежат в пределах от 10^{-8} до 10^{10} Ом; выпускаемые серийные приборы чаще охватывают диапазон от 0,001 до 10^9 Ом. Активное сопротивление можно измерять как на постоянном, так и на переменном токе. Измерение активного сопротивления на переменном токе целесообразно в цепях, где есть потери при перемагничивании (цепи со стальными сердечниками — катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы).

Среди промышленных способов измерения активных сопротивлений на постоянном токе можно выделить следующие:

- методы, основанные на использовании амперметра или вольтметра;
- логометрические методы;
- мостовые методы (аналоговые и цифровые приборы).

Измерение методами амперметра и вольтметра

Измерение методами амперметра и вольтметра сводится к определению тока или напряжения в цепи с измеряемым двухполюсником и последующему расчету его параметров по закону Ома. Метод можно использовать для измерения активного и полного сопротивления, индуктивности и емкости. На рис. 12.2 показана

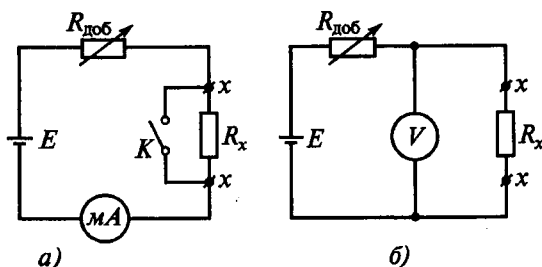


Рис. 12.2. Измерение активных сопротивлений методами: а — амперметра; б — вольтметра

структурная реализация этих методов при измерениях активного сопротивления. Измерение активных сопротивлений производят на постоянном токе, при этом включать резистор R_x в измерительную цепь можно по двум схемам.

В схеме с амперметром (рис. 12.2, а) отклонение показаний миллиамперметра пропорционально току:

$$I = \frac{E}{R_{\text{доб}} + R_x} \quad (12.1)$$

и обратно пропорционально измеряемому сопротивлению R_x . По такой схеме измеряют достаточно большие сопротивления (от 1 Ом до 200 МОм). Перед измерениями зажимы x замыкают ключом K и переменным резистором $R_{доб}$ устанавливают такой ток, чтобы стрелка отклонилась на всю шкалу, что соответствует точке 0 Ом.

Для измерения небольших сопротивлений (0,01...100 Ом) используется схема с вольтметром, изображенная на рис. 12.2, б. Показания вольтметра определяются формулой:

$$U = E \frac{R_x}{R_{доб} + R_x}, \quad (12.2)$$

при условии, что $R_{доб} \gg R_x$, $U \approx ER_x/R_{доб}$, т.е. имеет место прямая зависимость напряжения (показания вольтметра) от измеряемого сопротивления R_x . Перед измерением стрелку на приборе совмещают с отметкой « ∞ » при разомкнутых зажимах x .

Обе схемы приводят к методическим погрешностям измерения ΔR_x , зависящим от внутренних сопротивлений приборов. Очевидно, что в схеме рис. 12.2, а методическая погрешность измерения тем меньше, чем меньше внутреннее сопротивление амперметра (при $R_A \rightarrow 0$, $\Delta R_x \rightarrow 0$), а в схеме рис. 12.2, б эта погрешность тем меньше, чем больше внутреннее сопротивление вольтметра (при $R_V \rightarrow \infty$, $\Delta R_x \rightarrow 0$). Итак, схемой, показанной на рис. 12.2, а, следует пользоваться для измерения больших сопротивлений, а схемой, показанной на рис. 12.2, б, — для измерения малых сопротивлений. При этом наблюдается прямая зависимость показаний от напряжения питания E . Точность обоих методов невысока — погрешность измерения 1,5...2 %.

Рассмотренные методы измерения активного сопротивления до сих пор широко используются в малогабаритных комбинированных приборах — так называемых тестерах. Показания современных приборов обычно регистрируются с помощью цифровых табло.

Измерение с помощью логометра

Уменьшить влияние источника питания E на точность измерения активных сопротивлений позволяет применение магнитоэлектрического прибора — *логометра*, иногда еще встречающегося в лабораторной измерительной практике. Устройство и схема включения магнитоэлектрического логометра представлены на рис. 12.3.

Логометр состоит из двух жестко скрепленных между собой рамок, помещенных в неравномерное поле постоянного магнита (рис. 12.3, а). Неравномерность магнитного поля достигается за счет специальной конфигурации полюсных наконечников. Неравномерным поле делается для того, чтобы вращающие моменты, приложенные к рамкам, зависели не только от токов, протекающих в рамках, но и от положения рамок в магнитном поле, т.е.

$$M_1 = \psi_1(\alpha)I_1; \quad M_2 = \psi_2(\alpha)I_x, \quad (12.3)$$

где I_1 , I_x — токи, протекающие в рамках; $\psi_1(\alpha)$, $\psi_2(\alpha)$ — значения потокоосцеплений магнитов с соответствующими им рамками. Так как вращающие моменты рамок с протекающим в них током направлены в противоположные стороны, положение равновесия наступит при условии, когда $M_1 = M_2$; $\psi_1(\alpha)I_1 = \psi_2(\alpha)I_x$ и, следовательно, угол отклонения подвижной системы определится отношением токов:

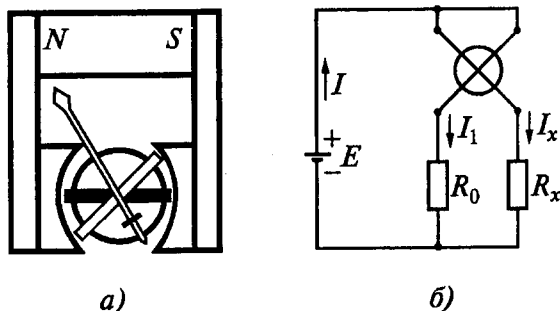


Рис. 12.3. Магнитоэлектрический логометр:
а — устройство; б — схема включения

$$\alpha = F(I_1/I_x). \quad (12.4)$$

Для схемы на рис. 12.3, б:

$$I_1 = \frac{E}{R_p + R_0}; \quad I_x = \frac{E}{R_p + R_x}, \quad (12.5)$$

где R_p — сопротивления рамок; R_0 — образцовое сопротивление.

Таким образом, показания логометра практически не зависят от колебания напряжения питания, так как

$$\alpha = F \left[\frac{R_p + R_x}{R_p + R_0} \right]. \quad (12.6)$$

Линейная зависимость показаний позволяет создавать лабораторные логометры с погрешностью измерений, не превышающей 0,5 %. Нечувствительность логометра к колебаниям напряжения питания позволила также разработать класс приборов, питающихся от генераторов, ротор которых вращают вручную. Эти приборы в настоящее время редко используют для определения сопротивления изоляции телефонных сетей и на производстве.

Электронные омметры

Современные *электронные омметры* аналогового типа выполняют на основе инвертирующего усилителя на ОУ, охваченного отрицательной обратной связью с помощью измеряемого сопротивления R_x (рис. 12.4). Напряже-

ние на выходе усилителя омметра нетрудно вычислить по уже приводимой формуле:

$$U_{\text{вых}} = -U \frac{R_x}{R_1}. \quad (12.7)$$

Поскольку выходное напряжение в схеме линейно связано с измеряемым сопротивлением R_x , то шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в единицах сопротивления. Шкала получается равномерной в широких пределах и практически не зависит от внешних (навесных) элементов усилителя. Погрешности измерения электронных омметров значительные (2...4) %.

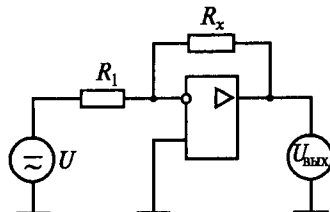


Рис. 12.4. Схема электронного омметра

В приборах для измерения особо больших сопротивлений (*тераомметрах*) сопротивления R_x и R_1 меняются местами, при этом шкала прибора получается обратной и напряжение

$$U_{\text{вых}} = -U \frac{R_1}{R_x}. \quad (12.8)$$

Погрешность измерения сопротивлений тераомметрами достигает 10 %.

Электронные измерители сопротивлений, построенные по приведенным схемам, используются для измерения сопротивлений и на переменном токе.

12.3. Мостовые измерители параметров элементов

Для измерения параметров элементов электрических цепей методом сравнения широко применяют мосты. Сравнение измеряемой величины (сопротивления, индуктивности, емкости) с образцовой мерой при помощи моста в процессе измерения может осуществляться вручную или автоматически, на постоянном или переменном токе. Мостовые схемы обладают высокой чувствительностью, большой точностью, широким диапазоном измеряемых значений параметров элементов. На основе мостовых методов строятся средства измерения, предназначенные как для измерения какой-либо одной величины, так и универсальные аналоговые и цифровые приборы.

Существует несколько разновидностей мостовых схем измерения параметров R , L , C на переменном токе: четырехплечие, шестиплечие (двойные), уравновешенные, неуравновешенные и процентные. Управление этими мостами может быть как ручным, так и автоматическим. Наибольшее распространение получили схемы четырехплечих уравновешенных мостов (рис. 12.5). Обобщенная структурная схема такого моста показана на рис. 12.5, а.

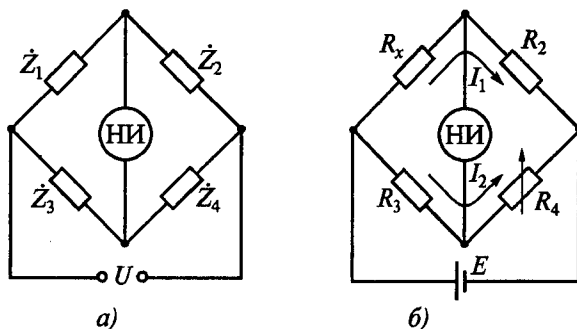


Рис. 12.5. Схемы четырехплечих мостов:

a — обобщенная; *б* — для измерения активных сопротивлений

Сопротивления четырехплечевого моста в общем случае носят комплексный характер:

$$\dot{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi_1}; \quad \dot{Z}_2 = Z_2 e^{j\varphi_2}; \quad \dot{Z}_3 = Z_3 e^{j\varphi_3}; \quad \dot{Z}_4 = Z_4 e^{j\varphi_4}, \quad (12.9)$$

где Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 — модули комплексных сопротивлений; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ — их соответствующие фазы.

Условия равновесия четырехплечевого моста определяются равенствами:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3; \quad (12.10)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (12.11)$$

Для выполнения этих условий необходимо наличие в плечах моста элементов с регулируемыми параметрами. Для обеспечения условия равенства амплитуд (12.10) наиболее удобно применять эталонное регулируемое активное сопротивление. В качестве элемента, обеспечивающего условие равенства фаз (12.11), используют эталонный конденсатор емкостью C_0 с малыми потерями.

Измерение параметров элементов на постоянном токе

Схема четырехплечевого уравновешенного моста постоянного тока для измерений активных сопротивлений представлена на рис. 12.5, б. Электронный или цифровой нуль-индикатор (НИ) включается в диагональ моста, ток в которой в момент измерения должен быть установлен равным нулю. Согласно условию (12.10) для равновесия моста необходимо, чтобы выполнялось равенство $R_x R_4 = R_2 R_3$, откуда неизвестное сопротивление можно выразить следующей формулой:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (12.12)$$

Для достижения равновесия четырехплечего моста с активными сопротивлениями достаточно иметь один регулируемый параметр (например, сопротивление резистора R_4), как показано на рис. 12.5, б. Пределы измеряемых сопротивлений для подобных мостов составляют от 10^{-2} до 10^7 Ом. Погрешности измерения — от сотых долей процента до нескольких процентов в зависимости от диапазона измерения.

Наименьшие погрешности лежат в диапазоне измерений от 100 Ом до 100 кОм. При малых измеряемых сопротивлениях вклад в погрешность измерения вносят сопротивления соединительных проводов, при больших — сопротивления утечек.

Показанная на рис. 12.5, б схема может быть цифровой. Для этого регулируемый резистор изготавливают в виде набора ряда сопротивлений, выполненных в соответствии с двоично-десятичным кодом. Сопротивления поочередно включают в плечо измерительного моста до тех пор, пока схема не уравнивается. Положение ключей характеризует собой код измеряемой величины, поступающий затем на цифровое отсчетное устройство.

Измерение индуктивности, добротности, емкости и тангенса угла потерь мостами переменного тока

Ряд распространенных схем мостов на переменном токе для измерения индуктивности и добротности катушек представлены на рис. 12.6. В них используются источники гармонического тока с амплитудой напряжения U и угловой частотой ω . Эти четырехплечие мосты обеспечивают наилучшую сходимость (уравновешивание). Эквивалентные схемы замещения для катушек индуктивности с потерями могут быть последовательными или параллельными в зависимости от потерь, отраженных активным сопротивлением.

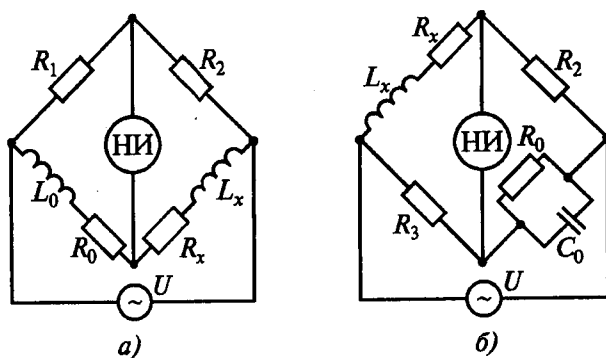


Рис. 12.6. Схемы мостов для измерения индуктивностей и их добротностей с образцовыми элементами:
а — катушкой; б — конденсатором

Условие равновесия моста для схемы рис. 12.6, а имеет вид:

$$R_1(R_x + j\omega L_x) = R_2(R_0 + j\omega L_0), \quad (12.13)$$

где L_x и R_x — измеряемые индуктивность и сопротивление омических потерь в катушке; L_0 и R_0 — образцовые индуктивность и сопротивление.

Приравняв действительные и мнимые члены формулы (12.13), получим:

$$L_x = L_0 R_2 / R_1; \quad R_x = R_0 R_2 / R_1. \quad (12.14)$$

Поскольку изготовление высокочастотных образцовых катушек вызывает определенные трудности, часто в качестве образцовой меры в мостах переменного тока применяется конденсатор (рис. 12.6, б). Для этой схемы:

$$R_x + j\omega L_x = R_2 R_3 (1/R_0 + j\omega C_0). \quad (12.15)$$

Если приравнять отдельно в данном уравнении вещественную и мнимую части, получим следующие выражения для определения параметров катушки индуктивности:

$$R_x = R_2 R_3 / R_0; \quad L_x = C_0 R_2 R_3. \quad (12.16)$$

Добротность катушки

$$Q_x = \omega L_x / R_x = R_0 \omega C_0. \quad (12.17)$$

Для измерения емкости и тангенса угла потерь конденсаторов с достаточно малыми потерями применяют мостовую схему, представленную на рис. 12.7, а (последовательное соединение элементов C_x и R_x), а с большими потерями — на рис. 12.7, б (параллельное соединение элементов C_x и R_x).

Условие равновесия для схемы рис. 12.7, а имеет вид:

$$R_4[R_x + 1/(j\omega C_x)] = R_2[R_0 + 1/(j\omega C_0)].$$

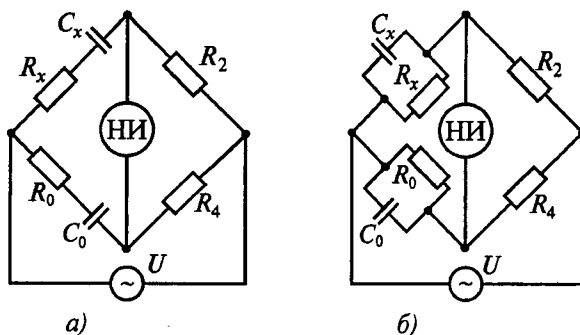


Рис. 12.7. Схемы мостов для измерения емкости и тангенса угла потерь:
а — с малыми потерями; б — с большими потерями

Разделив здесь вещественную и мнимую части, получим следующие формулы для определения параметров конденсатора:

$$C_x = C_0 R_4 / R_2; \quad R_x = R_2 R_0 / R_4. \quad (12.18)$$

Тангенс угла потерь конденсатора

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x = \omega C_0 R_0. \quad (12.19)$$

Для моста с параллельным соединением C_x и R_x (рис. 12.7, б) условие равновесия запишется как:

$$R_4 R_x (1 + j\omega C_0 R_0) = R_2 R_0 (1 + j\omega C_x R_x).$$

Отсюда

$$C_x = C_0 R_4 / R_2; \quad R_x = R_2 R_0 / R_4. \quad (12.20)$$

Тангенс угла потерь конденсатора при параллельной схеме его замещения:

$$\operatorname{tg} \delta_x = 1/(\omega C_x R_x) = 1/(\omega C_0 R_0). \quad (12.21)$$

Поскольку условия уравнивания моста зависят от частоты, то мостовые схемы измерения предназначены для работы на одной из определенных частот, например: 50, 400, 1000 Гц.

Уравнивание схем достигается поочередным регулированием переменных образцовых сопротивлений или емкостей. Эта процедура называется шагами, а количество шагов определяет сходимость моста. Мост с хорошей сходимостью имеет не более пяти шагов.

Мосты переменного тока работают на низких частотах 500...5000 Гц. При работе на повышенных частотах погрешности измерения резко возрастают.

Погрешность измерений моста переменного тока определяется погрешностями значений элементов образующих мост, переходных сопротивлений контактов, чувствительностью схемы и индикатора. Мосты переменного тока больше чем мосты постоянного тока подвержены влиянию помех и паразитных связей между плечами, плечами и землей, мостом и оператором. Поэтому, даже при тщательном экранировании моста и принятии других мер защиты, погрешности мостов переменного тока больше, чем погрешности мостов постоянного тока. Выпускаемые отечественной промышленностью уравновешенные мосты переменного тока обеспечивают погрешность измерения от 0,5 до 5 %.

12.4. Резонансные методы измерения параметров элементов

Резонансный метод измерения основывается на настройке в резонанс колебательного контура, составленного из образцового и измеряемого элементов (индуктивностей или емкостей) и определении его резонансной частоты. Этот метод применяется для измерения индуктивностей и емкостей только

на высоких частотах, так как в области низких частот резонансные явления проявляются недостаточно резко, что не позволяет получить высокую точность измерения.

С помощью резонансных схем осуществляют измерение путем замещения, при котором один и тот же эффект (например, резонанс на фиксированной частоте) повторяется дважды: первый раз — с измеряемым элементом, второй — с мерой той же физической природы. За результат измерения принимают значение, равное величине меры при резонансе. Резонансные схемы удобны при точных измерениях относительно малых значений индуктивностей и взаимной индуктивности, емкостей, тангенсов углов потерь конденсаторов и т.д.

Наиболее универсальным прибором для измерения параметров цепей резонансным методом является *куметр* (от латинской буквы Q — характеристики добротности катушки индуктивности), в котором основная измерительная цепь — последовательный резонансный контур.

Упрощенная структурная схема куметра показана на рис. 12.8.

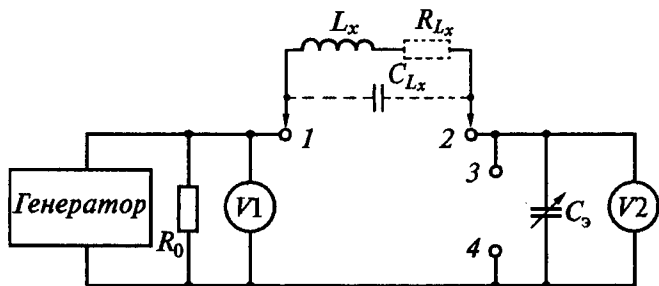


Рис. 12.8. Упрощенная структурная схема куметра

Источником синусоидальных сигналов, подаваемых на последовательный резонансный контур, является генератор тока, нагруженный на малое активное сопротивление $R_0 \approx 0,05$ Ом. Частота выходных колебаний генератора может изменяться в широких пределах. Уровень входного сигнала необходимо поддерживать постоянным (что контролируется по вольтметру $V1$).

При измерении индуктивности исследуемую катушку подключают к зажимам 1–2. В этом случае резонансный контур будет образован катушкой измеряемой индуктивности L_x с активными потерями R_{Lx} и межвитковой емкостью ее проводов C_{Lx} , а также перестраиваемой эталонной емкостью C_3 . Резонанс в контуре на заданной частоте достигается изменением величины емкости C_3 эталонного конденсатора. Состояние резонанса контура определяется по вольтметру $V2$, отградуированному в значениях добротности Q .

Измерение индуктивности L_x с учетом емкости C_{L_x} производят на двух резонансных частотах, которые можно вычислить следующим образом:

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x(C_{31} + C_{L_x})}}; \quad f_{p2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x(C_{32} + C_{L_x})}}, \quad (12.22)$$

где C_{31} и C_{32} — измеренные эталонные емкости при частотах f_{p1} и f_{p2} соответственно.

Пусть соотношение частот $f_{p1} = Kf_{p2}$, где коэффициент K — вещественное число. Тогда совместное решение уравнений (12.22) позволяет вычислить ранее неизвестные значения параметров L_x и C_{L_x} по формулам:

$$L_x = \frac{K^2 - 1}{(2\pi f_{p1})^2 (C_{32} - C_{31})}; \quad (12.23)$$

$$C_{L_x} = \frac{C_{32} - C_{31}K^2}{K^2 - 1}. \quad (12.24)$$

С помощью куметра можно также определять неизвестные параметры R , C , $\text{tg}\delta_C$, подключая измеряемые резистор или конденсатор к зажимам 3 — 4.

Погрешности измерения куметром параметров L , C , $\text{tg}\delta_C$, R составляют 1...5 % в зависимости от используемой схемы. Причинами появления этих погрешностей могут являться: нестабильность генератора, наличие в контуре постороннего сопротивления R_0 , неточность шкалы конденсатора эталонной емкости C_3 , погрешности измерительных приборов $V1$, $V2$, погрешность считывания показаний.

12.5. Цифровые приборы для измерения параметров элементов

Цифровые средства измерения параметров элементов электрических цепей чаще всего используют сочетание аналогового преобразователя, преобразующего определяемый параметр элемента в активную величину, и соответствующего цифрового прибора для измерения этой величины.

Одним из методов измерения сопротивления, индуктивности и емкости является метод прямого преобразования их значений в пропорциональный интервал времени и измерение этого интервала путем заполнения его счетными импульсами. Этот метод измерения называют *методом дискретного счета*.

Второй способ цифрового измерения параметров элементов использует уравнивающее преобразование сопротивления, индуктивности и емкости, основанное на сравнении измеряемой величины с образцовой.

Метод дискретного счета

При методе дискретного счета используются закономерности аperiodического процесса, возникающего при подключении заряженного конденсатора или катушки индуктивности с протекающим в ней током к образцовому резистору. При измерении активного сопротивления применяют процесс разряда образцового конденсатора через измеряемый резистор.

Измеренный интервал времени оказывается функционально связанным с преобразуемым параметром. Данные преобразователи отличаются высокой точностью, быстродействием, линейностью функции преобразования, удобным для преобразования в цифровой код видом выходного сигнала.

Схема простейшего преобразователя сопротивлений, индуктивностей и емкостей в интервал времени (период меандрового напряжения) показана на рис. 12.9, а.

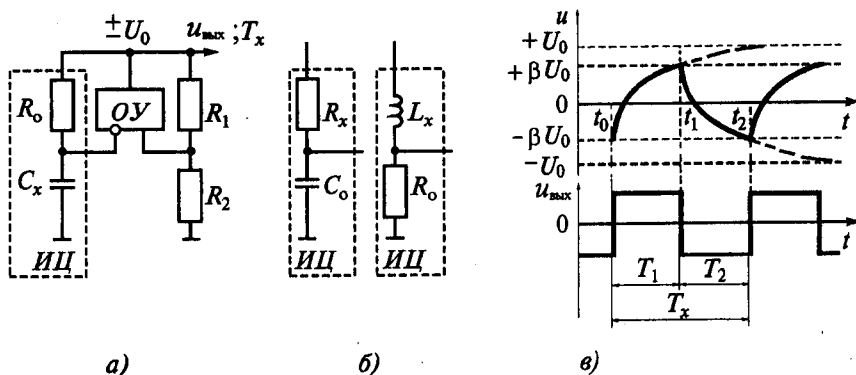


Рис. 12.9. Преобразователь параметров элементов в интервал времени:
а — схема; б — измерительные цепи; в — временные диаграммы

Измерительная цепь (ИЦ) интегрирующего типа с постоянной времени $\tau_x = R_0 C_x$ (или $R_x C_0$, или L_x / R_0 — рис. 12.9, б) питается выходным напряжением операционного усилителя (ОУ), являющегося компаратором. Порог его срабатывания задается резистивным делителем R_1 и R_2 (коэффициентом передачи цепи положительной обратной связи). Временные диаграммы работы преобразователя параметров элементов приведены на рис. 12.9, в.

При подаче с выхода ОУ на ИЦ в момент времени t_0 напряжения U_0 происходит его интегрирование измерительной цепью. Напряжение на инвертирующем входе ОУ имеет следующую аналитическую запись:

$$u(t) = U_0(1 + \beta)(1 - e^{-t/\tau_x}) - \beta U_0, \quad (12.25)$$

где $\beta = R_2 / (R_1 + R_2)$ — коэффициент передачи цепи положительной ОС.

При достижении этой функцией порогового значения $+\beta U_0$ (момент времени t_1) компаратор срабатывает и изменяет на выходе знак напряжения U_0 на противоположный. Можно показать, что интервал интегрирования

$$T_1 = t_1 - t_0 = \tau_x \ln \frac{(1+\beta)}{(1-\beta)}. \quad (12.26)$$

На следующем интервале времени $T_2 = t_2 - t_1$ происходит формирование разветвляющей функции с противоположным знаком производной. Очевидно, что при равенстве значений положительного и отрицательного порогов срабатывания $|\beta U_0| = |-\beta U_0|$, интервалы T_1 и T_2 равны. При этом период напряжения на выходе ОУ определяется выражением

$$T_x = T_1 + T_2 = 2\tau_x \ln \frac{(1+\beta)}{(1-\beta)}. \quad (12.27)$$

Этот интервал измеряется цифровым измерителем интервалов (или частотомером). Результат измерения периода T_x пропорционален значению определяемого параметра R_x (или C_x , или L_x).

В качестве примера на рис. 12.10 показана структурная схема цифрового измерителя емкости и сопротивления, реализующая метод дискретного счета, а на рис. 12.11 — временные диаграммы к схеме.

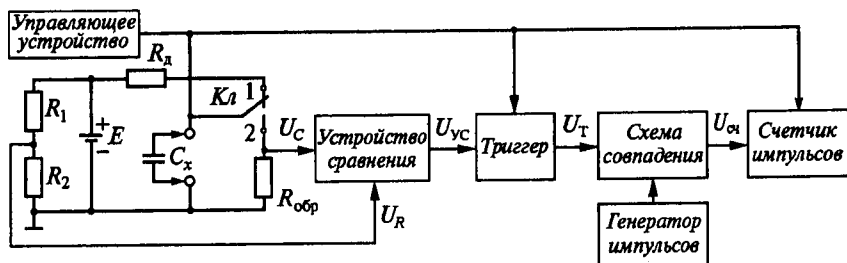


Рис. 12.10. Цифровой измеритель емкости и сопротивления

Перед измерением емкости ключ Kl (рис. 12.10) устанавливают в положение 1 и конденсатор C_x заряжается через ограничительный резистор R_d до значения стабилизированного источника напряжения E .

В момент начала измерения емкости t_1 (рис. 12.11, а) управляющее устройство импульсом управления переключает триггер из состояния 0 в состояние 1, очищает предыдущие показания счетчика импульсов и переводит ключ Kl в положение 2. Измеряемый конденсатор C_x начинает разряжаться через образцовый резистор $R_{обр}$ по экспоненциальному закону (рис. 12.11, б), который описывается уравнением:

$$U_C = Ee^{-(t-t_1)/\tau}, \quad (12.28)$$

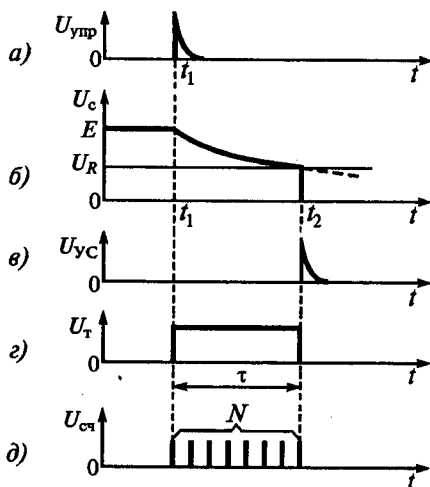


Рис. 12.11. Временные диаграммы к рис. 12.10:
 а — импульсы управления; б — процесс разряда конденсатора; в — сигнал на выходе УС;
 г — сигнал триггера; д — импульсы на входе счетчика

где $\tau = R_{\text{обр}} C_x$ — постоянная времени цепи разряда конденсатора.

В момент времени t_1 единичный импульс U_t с выхода триггера открывает схему совпадения и счетчик начинает счет тактовых импульсов генератора, следующих с некоторой частотой f .

Напряжение U_c подается на один из входов устройства сравнения, ко второму входу которого подводится напряжение с делителя, состоящего из резисторов R_1 и R_2 . Это напряжение определяется следующим выражением:

$$U_R = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (12.29)$$

Сопротивления R_1 и R_2 выбирают так, чтобы при разряде конденсатора уменьшающееся напряжение U_c по истечении времени τ стало равным напряжению при разряде U_R . В момент t_2 , когда сравниваются эти напряжения, на выходе устройства сравнения возникает импульс U_{yc} , переключающий триггер в исходное состояние, при котором задним фронтом его импульса U_t закрывается схема совпадения, и счетчик прекращает счет тактовых импульсов (рис. 12.11, б — д).

Поскольку при $t = t_2$ напряжения $U_c = U_R$ и $\tau = t_2 - t_1$, то

$$e^{-(t_2 - t_1)/\tau} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (12.30)$$

или

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = e^{-1} = \frac{1}{2,718} = 0,368. \quad (12.31)$$

Напряжение U_R , снимаемое с делителя R_1, R_2 , имеет определенное значение ($U_R = 0,368E$), что достигается подбором сопротивлений его резисторов.

За интервал времени $\tau = R_{\text{обр}} C_x$ на счетчик поступает число импульсов

$$N = f\tau, \quad (12.32)$$

где f — частота следования счетных импульсов.

Так как $\tau = R_{\text{обр}} C_x$, то при фиксированных значениях частоты f и сопротивления $R_{\text{обр}}$

$$C_x = N/(fR_{\text{обр}}) = N/K_1, \quad (12.33)$$

где коэффициент $K_1 = fR_{\text{обр}}$.

Согласно (12.33), величина измеряемой емкости прямо пропорциональна числу импульсов N , поступивших на счетчик.

Наличие образцового конденсатора $C_{\text{обр}}$ позволяет аналогичным образом измерить сопротивление резистора:

$$R_x = N/(fC_{\text{обр}}) = N/K_2, \quad (12.34)$$

где коэффициент $K_2 = fC_{\text{обр}}$.

Цифровые измерительные приборы, построенные по методу дискретного счета, получили широкое распространение при измерении параметров электрических цепей. К достоинствам метода следует отнести, прежде всего, достаточно высокую точность измерений. Погрешность измерений цифровым методом составляет 0,1...0,2 % и зависит в основном от нестабильности сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , $R_{\text{обр}}$ или конденсатора $C_{\text{обр}}$, нестабильности частоты f генератора счетных импульсов, а также неточности срабатывания устройства сравнения. К недостаткам таких приборов можно отнести трудность измерения параметров на рабочей частоте.

Измерение параметров элементов методом уравнивающего преобразования

Наряду с методами прямого преобразования (дискретного счета) в практике используются также методы уравнивающего преобразования измеряемых значений сопротивления, индуктивности и емкости, основанные на сравнении измеряемой величины с образцовой. Сравнение измеряемой величины с образцовой чаще всего осуществляется путем уравнивания мостовой измерительной цепи, в одно из плеч которой включается исследуемый двухполюсник. В смежное плечо моста включается образцовый элемент, представляющий собой набор квантованных образцовых мер, соответствующих весовым коэффициентам разрядов используемого цифрового кода. Изменением параметров образцового двухполюсника добиваются равенства нулю напряжения в измерительной диагонали.

Достоинствами цифровых измерителей являются высокая точность и широкий динамический диапазон. К их недостаткам относится достаточно низкое быстродействие.

На рис. 12.12 показана структурная схема цифрового моста постоянного тока уравнивающего типа для измерения активного сопротивления резистора или другого элемента с омическими потерями.

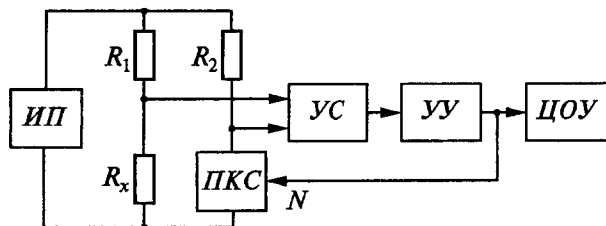


Рис. 12.12. Структурная схема цифрового моста постоянного тока уравнивающего типа

Измеряемый резистор R_x , образцовые резисторы R_1 и R_2 и преобразователь кода в сопротивление (ПКС) образуют мост, который питается источником постоянного напряжения (ИП). Разбаланс моста фиксируется устройством сравнения (УС). Устройство управления (УУ) анализирует выходной сигнал УС и в зависимости от его знака увеличивает или уменьшает цифровой код N , выдаваемый на ПКС. Уравнивание производится до тех пор, пока напряжение в выходной диагонали моста не станет меньше порога чувствительности УС. При этом измеряемое сопротивление

$$R_x = R_1 R_{\text{ПКС}} / R_2 = k_{\text{ПКС}} N R_1 / R_2, \quad (12.35)$$

где $R_{\text{ПКС}}$ — сопротивление ПКС; $k_{\text{ПКС}} = R_{\text{ПКС}} / N$ — коэффициент преобразования ПКС.

Как следует из формулы (12.35), результат измерения (он фиксируется цифровым отсчетным устройством — ЦОУ) не зависит от напряжения питания.

Пределы измерения подбирают путем изменения отношения сопротивлений резисторов R_1 и R_2 цепи положительной обратной связи. Погрешность измерения определяется стабильностью сопротивления образцовых резисторов R_1 и R_2 и точностью ПКС.

Цифровые мосты постоянного тока уравнивающего типа обеспечивают погрешность измерения параметров около 0,01 % и поэтому широко используются для точного измерения активного сопротивления резисторов.

Более сложными по структуре построения являются мосты переменного тока, предназначенные для измерений комплексного сопротивления, индуктивности и емкости при определенной фиксированной частоте (обычно около 1 кГц). Эти мосты выполняют уравнивание по двум параметрам, т.е. производят раздельное и независимое уравнивание двух составляющих комплексного сопротивления Z_x .

Цифровые автоматические приборы с микропроцессором

В цифровых автоматических приборах для измерения сопротивления, индуктивности и емкости широко используются методы, связанные с преобразованием измеряемого параметра в напряжение или ток, частоту или интервал времени, а также методы на основе мостовых и компенсационных схем.

Наибольшее распространение получили цифровые автоматические приборы с микропроцессором, выполненные по схемам с использованием уравновешенных мостов. Уравновешивание осуществляется автоматическим регулированием двух органов моста (для каждого из измеряемых параметров). Упрощенная структурная схема цифрового автоматического измерителя комплексного сопротивления с микропроцессором приведена на рис. 12.13.

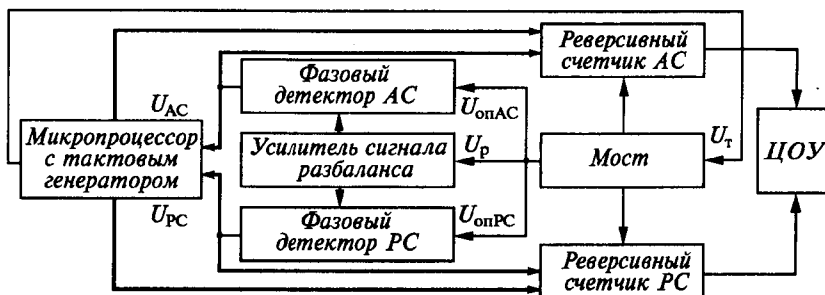


Рис. 12.13. Упрощенная структурная схема цифрового автоматического измерителя комплексного сопротивления с микропроцессором

В основе данного способа измерения параметров цепей цифровым прибором лежит мостовой метод с фазочувствительными детекторами уравновешивания. Питание мостовой схемы осуществляется от генератора переменного напряжения (на рисунке для упрощения не показан).

Микропроцессор с встроенным тактовым генератором определенной частоты выполняет все функции управления измерительным процессом. Напряжение разбаланса моста U_p через усилитель сигнала разбаланса поступает на входы фазовых детекторов активной АС и реактивной РС составляющих. Опорные напряжения фазовых детекторов $U_{опАС}$ и $U_{опРС}$ снимаются с мостовой схемы. С фазовых детекторов напряжение разбаланса подается на реверсивные счетчики, управляющие состоянием органов уравновешивания мостовой схемы, и на микропроцессор, задающий сигналами U_{AC} и U_{PC} скорость счета соответствующих реверсивных счетчиков.

Направление счета реверсивных счетчиков определяется знаком напряжения разбаланса фазовых детекторов, скорость счета — значением этого напряжения. Изменение состояния счетчика, вызванное приходом на мост каждого тактового импульса U_p тактового генератора, приводит к изменению

значения регулирующего параметра на одну единицу младшего разряда. Опорные напряжения фазовых детекторов выбираются такими, что сигналы, вырабатываемые ими, определяются отклонением органа управления от состояния равновесия: сигнал одного детектора отклонением по активной составляющей АС, сигнал другого — по реактивной составляющей РС. Управление мостом осуществляется сигналом U_T микропроцессора.

По мере приближения к состоянию баланса моста напряжение разбаланса уменьшается, вследствие чего замедляется скорость его уравнивания. При достижении состояния равновесия мостовой схемы дискретное уравнивание прекращается и результаты измерения поступают на цифровые отсчетные устройства (ЦОУ).

Микропроцессор осуществляет самокалибровку прибора перед началом измерений, и учитывает влияние внешних условий на точность измерений.

12.6. Измерение амплитудно-частотных характеристик

Как уже отмечалось, в радиотехнике широко распространены линейные четырехполосники. Их важнейшей характеристикой является частотный коэффициент передачи (чаще просто *коэффициент передачи*). Коэффициент передачи определяют как отношение комплексных амплитуд выходного $U_{\text{вых}}(j\omega) = U_{\text{вых}}$ и входного $U_{\text{вх}}(j\omega) = U_{\text{вх}}$ гармонических напряжений одной и той же частоты ω :

$$K(j\omega) = K(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (12.36)$$

Модуль $K(\omega)$ называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ); аргумент $\varphi(\omega)$ — фазочастотной характеристикой (ФЧХ) четырехполосника. Как правило, АЧХ имеет один максимум, а ФЧХ изменяется монотонно в зависимости от частоты (рис. 12.14, а, б).

В области некоторой полосы частот отклик линейного четырехполосника на входное воздействие начинает уменьшаться. В связи с этим используют понятие *полосы пропускания (рабочей полосы)* — области частот, где модуль коэффициента передачи

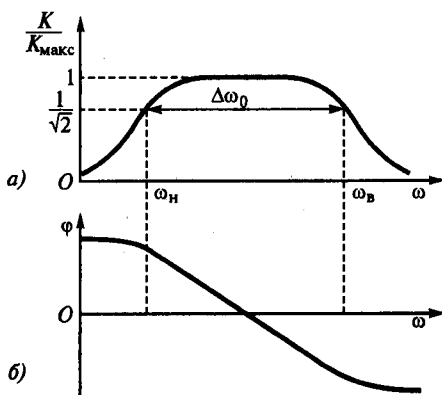


Рис. 12.14. Характеристики четырехполосника:
а — АЧХ; б — ФЧХ

$K(\omega)$ становится не менее $1/\sqrt{2}$ своего максимального значения. Наиболее же удобен при практических расчетах нормированный модуль коэффициента передачи $K/K_{\text{макс}}$, максимальная величина которого равна единице. Значение $1/\sqrt{2} = 0,707$, по которому определяют полосу пропускания линейной цепи, введено не случайно. Дело в том, что на границах полосы пропускания модуль коэффициента передачи по мощности, равный отношению выходной и входной мощностей, уменьшается в два раза.

На рис. 12.14, а полоса пропускания линейного четырехполосника заключена в области от *нижней* ω_n до *верхней* ω_b частоты и поэтому ее ширина составляет $\Delta\omega_0 = \omega_b - \omega_n$. При практических расчетах пользуются не круговой, а *циклической* частотой $f = \omega/(2\pi)$. В этом случае полоса пропускания линейного четырехполосника:

$$\Delta f_0 = f_b - f_n, \quad (12.37)$$

где f_b — верхняя, а f_n — нижняя граничные циклические частоты.

Приборы для исследования амплитудно-частотных характеристик обычно позволяют снимать кривую зависимости амплитуды напряжения на выходе цепи от частоты синусоидального напряжения на входе при постоянной его амплитуде. При измерении фазочастотных характеристик определяют частотную зависимость разности фаз между синусоидальными напряжениями на выходе и входе исследуемого устройства. Производную от ФЧХ по угловой частоте называют частотной характеристикой *группового времени запаздывания*.

При экспериментальных исследованиях чаще всего требуется определить АЧХ четырехполосников. Это объясняется следующими причинами. АЧХ наглядно отражает свойства цепи в заданном диапазоне частот; ее можно получить, используя стандартные измерительные приборы. Кроме того, для минимально-фазовых цепей — колебательных контуров, фильтров, линейных усилителей и других устройств, в которых отсутствуют перекрестные связи, — существует однозначное соответствие между частотными характеристиками, вследствие чего ФЧХ можно вычислить по снятой АЧХ. Кстати отметим, что к неминимально-фазовым цепям относятся мостовые схемы. Практически при настройке минимально-фазовых цепей достаточно обеспечить заданную форму их АЧХ. При этом будут получены вполне определенные ФЧХ и характеристика группового времени запаздывания.

Структурные схемы измерителей АЧХ

Приборы для исследований амплитудно-частотных характеристик линейных цепей и устройств называют измерителями АЧХ. Их широко используют в лабораторных и производственных условиях для настройки и контроля радиоаппаратуры.

Структурная схема для измерения АЧХ приведена на рис. 12.15, а. Диапазонный генератор гармонических колебаний перестраивают в исследуемом диапазоне частот. АЧХ, или зависимость амплитуды выходного напряжения исследуемой цепи от частоты (при постоянной амплитуде напряжения на входе), снимают с помощью цифрового вольтметра по точкам при последовательной настройке генератора на частоты f_1, f_2, f_3 и т. д. По результатам измерений графически строят искомую АЧХ (рис. 12.15, б).

Рассмотренный способ достаточно трудоемок. Кроме того, могут быть упущены изменения АЧХ в промежутках между точками измерений. Недостатки этого способа особенно заметны при настройке радиотехнических схем, когда после каждого изменения элементов схемы всю процедуру снятия АЧХ приходится повторять.

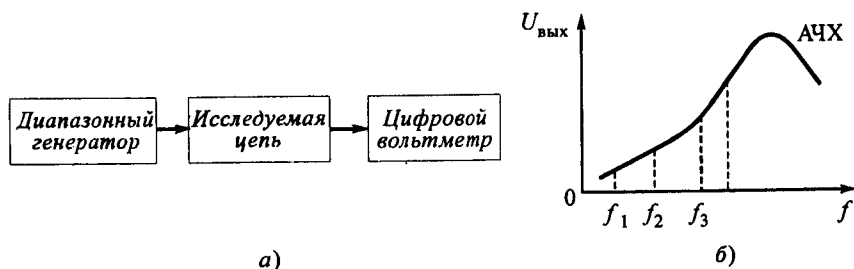


Рис. 12.15. К методу снятия АЧХ по точкам:
а — структурная схема; б — графическое построение АЧХ

В настоящее время применение находят панорамные измерители АЧХ, построенные на основе генератора качающейся частоты и цифровой схемы управления и настройки и электронно-лучевого или современного дисплея. По принципу действия панорамные измерители АЧХ близки к гетеродинным анализаторам спектра (см. раздел 11.5; рис. 11.4). Однако между этими приборами имеются и различия, связанные с тем, что анализаторы спектра предназначены для измерения параметров сигналов, а измерители АЧХ служат для исследования характеристик цепей и устройств.

Упрощенная структурная схема панорамного измерителя АЧХ приведена на рис. 12.16. Основой прибора является генератор качающейся частоты, создающий высокочастотное напряжение с постоянной амплитудой и периодически меняющейся частотой. Закон изменения частоты определяется формой модулирующего напряжения, в качестве которого часто используют пилообразное напряжение развертки. Огибающая напряжения на выходе цепи повторяет форму АЧХ. Если это напряжение подать на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ или другого типа дисплея, на экране появится изображение АЧХ.

Напряжение на индикаторное устройство можно подавать непосредственно с выхода исследуемой цепи — режим 1 или после детектора и усили-

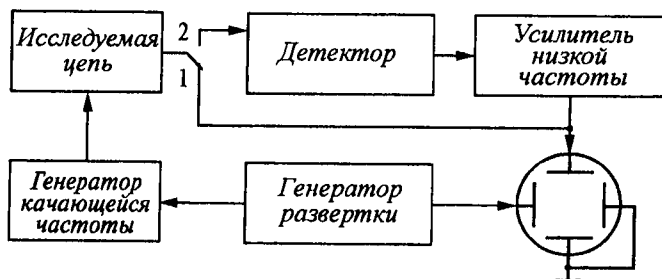


Рис. 12.16. Упрощенная структурная схема панорамного измерителя АЧХ

теля низкой частоты — режим 2 (переключатель на схеме рис. 12.16 в положениях 1 или 2). Соответствующие изображения на экране дисплея приведены на рис. 12.17.

Первый режим применяют в тех случаях, когда напряжение на выходе цепи имеет достаточно большую амплитуду. При этом устраняются ошибки, связанные с нелинейностью характеристики детектора и неравномерностью АЧХ усилителя низкой частоты. Второй режим используют при исследовании четырехполосников с малым коэффициентом усиления. Показанная на рис. 12.17 горизонтальная линия прочерчивается автоматически во время обратного хода луча. Генератор качающей частоты на это время запирается напряжением генератора развертки.

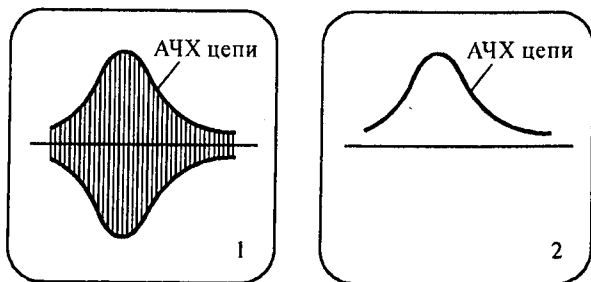


Рис. 12.17. Изображения АЧХ на экране индикатора

Применяемые в последние годы измерители АЧХ кроме элементов, показанных на рис. 12.16, имеют ряд дополнительных устройств, повышающих точность воспроизведения исследуемых АЧХ на экране дисплея и улучшающих ряд других свойств прибора. Назначение этих устройств нетрудно пояснить на примере обобщенной структурной схемы панорамного измерителя АЧХ (рис. 12.18).

Согласно принципу действия измерителя АЧХ, отклонение луча дисплея по горизонтали должно быть пропорционально частоте, т.е. необходимо обеспечить линейную зависимость между мгновенными значениями напряжения развертки и частоты ГКЧ. Отклонения от линейной зависимости

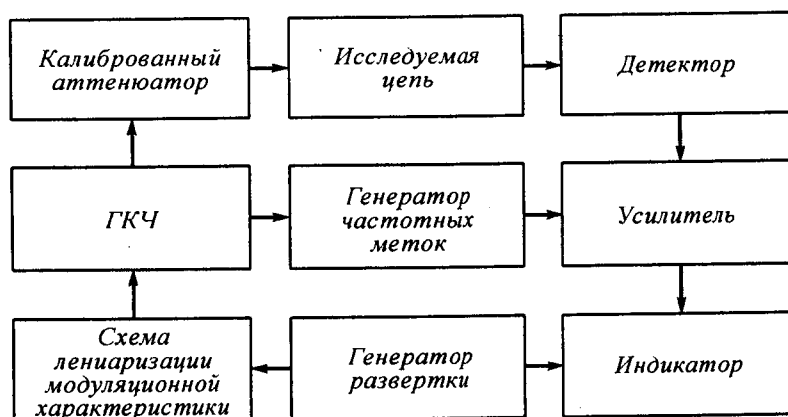


Рис. 12.18. Обобщенная структурная схема панорамного измерителя АЧХ

приводят к неравномерности частотного масштаба на экране прибора и к искажениям формы исследуемых АЧХ. Чтобы это устранить, в измеритель АЧХ введена *схема линеаризации модуляционной характеристики* ГКЧ. Однако качание частоты может сопровождаться изменением амплитуды напряжения ГКЧ, что приведет к искажениям формы исследуемых АЧХ на экране. Поэтому в данном приборе имеется устройство автоматической регулировки амплитуды (на рис. 12.18 не показано), стабилизирующее напряжение на выходе ГКЧ.

Чтобы изменить напряжение, подаваемое на исследуемую цепь, на выходе ГКЧ включен переменный калиброванный аттенуатор. Измерение частот в характерных точках исследуемых АЧХ производят с помощью генератора частотных меток. Как правило, метки формируют из нулевых биений, полученных смещением напряжения ГКЧ с напряжением, спектр которого содержит набор калибровочных частот. Усиленное напряжение меток подается на дисплей и образует частотную шкалу на экране прибора.

Отметим, что основное назначение измерителей АЧХ — исследование амплитудно-частотных характеристик линейных четырехполосников. Вместе с тем возможно с помощью измерителей АЧХ исследовать частотную зависимость крутизны АЧХ, измерять добротности контуров и резонаторов.

12.7. Измерение параметров линейных СВЧ-устройств

Измерения параметров цепей в СВЧ-диапазоне имеют ряд особенностей. При измерениях в СВЧ-диапазоне необходимо учитывать два основных фактора:

- соизмеримость длины волны колебания с геометрическими размерами элементов;

- наличие пространственного электромагнитного поля в линиях передач, которое и является основным носителем электрической энергии.

К СВЧ-устройствам относятся: коаксиальные, волноводные и полосковые тракты (линии передач), двухполюсные, четырехполюсные и многополюсные устройства, работающие на частотах от 300 МГц до 300 ГГц.

Измеряют параметры СВЧ-устройств двумя основными способами:

- с помощью измерительной линии анализируют распределение электромагнитного поля в СВЧ-тракте и расчетным путем определяют искомые параметры;

- посредством автоматических измерителей панорамного типа, основанных на раздельном измерении падающей и отраженной электромагнитных волн, визуально наблюдают процессы, происходящие в исследуемых цепях.

Поскольку размеры СВЧ-узлов измерительной линии соизмеримы с длиной волны электромагнитных колебаний λ , то в ней устанавливаются, в зависимости от характера нагрузки, режимы бегущих, стоячих или смешанных волн (их положительных значений, полученных после детектирования), как показано на рис. 12.19.

Основными параметрами СВЧ-устройств являются: длина волны; волновое (характеристическое сопротивление); затухание (потери); максимальная мощность. Из теории длинных линий известно, что для описания свойств СВЧ-двухполюсников вполне достаточно знать *комплексный коэффициент отражения* (проще, *коэффициент отражения*) в рабочем диапазоне частот и *волновое (характеристическое) сопротивление* тракта, на котором он скон-

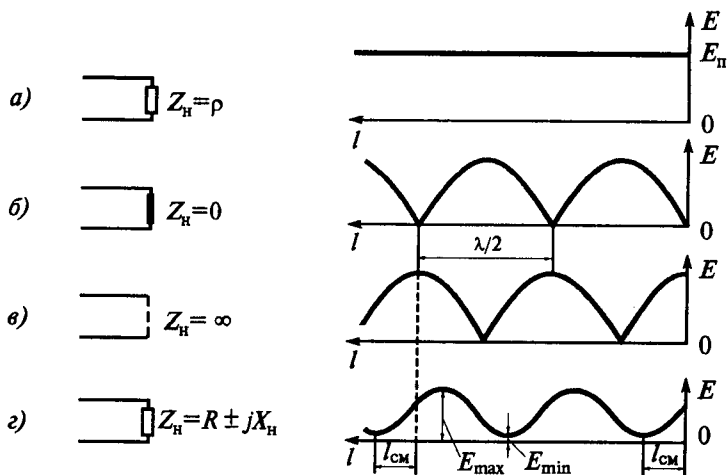


Рис. 12.19. Распределение поля вдоль измерительной линии в режимах: а — бегущей волны; б — короткого замыкания; в — холостого хода; г — смешанных волн

струирован. Волновое сопротивление относится к вторичным параметрам длинных линий, полностью определяется конструкцией тракта и находится расчетным путем по его геометрическим размерам.

Для полной передачи мощности СВЧ-колебания от генератора к нагрузке необходимо, чтобы сопротивление нагрузки было активным и равно волновому сопротивлению линии: $Z_n = R_n = \rho$. Здесь ρ — волновое сопротивление измерительной линии на СВЧ. Такая нагрузка называется согласованной.

Комплексный коэффициент отражения определяется как отношение комплексной амплитуды напряжения волны, отраженной от нагрузки, к комплексной амплитуде напряжения волны, падающей на нее:

$$\dot{r} = \frac{\dot{E}_o}{\dot{E}_n} = \left| \frac{\dot{E}_o}{\dot{E}_n} \right| e^{j\varphi}. \quad (12.38)$$

Здесь

$$\varphi = \frac{4\pi l_{cm}}{\lambda} - \pi \quad (12.39)$$

— фазовый угол коэффициента отражения; $\dot{E}_n$ и $\dot{E}_o$ — комплексные амплитуды соответственно падающей и отраженной волн; l_{cm} — величина смещения первого минимума относительно конца линии при нагрузке (рис. 12.19).

Коэффициент отражения характеризует степень согласования линии с нагрузкой. Фазовый угол коэффициента отражения определяется величиной смещения l_{cm} первого минимума относительно конца линии. Смещение l_{cm} можно найти в любой точке измерительной линии, принятой за ее условный конец. Условный конец определяется по удобному для отсчета минимуму при закороченной линии. В свою очередь, коэффициент отражения определяется через параметры нагрузки и волновое сопротивление измерительной линии:

$$\dot{r} = \frac{\dot{Z}_n - \rho}{\dot{Z}_n + \rho}, \quad (12.40)$$

$$\rho \cong \sqrt{L/C}, \quad (12.41)$$

где L и C — соответственно индуктивность и емкость линии на единицу длины; $\dot{Z}_n$ — комплексное сопротивление нагрузки;

Модуль коэффициента отражения можно определить через параметры электромагнитного поля линии, которые выражаются через коэффициент бегущей волны (КБВ) или коэффициент стоячей волны (КСВ). Коэффициент бегущей волны

$$K_{бв} = \frac{E_{min}}{E_{max}}, \quad (12.42)$$

а коэффициент стоячей волны

$$K_{\text{св}} = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{min}}}, \quad (12.43)$$

где E_{min} , E_{max} — соответственно минимальная и максимальная амплитуды смешанной волны (рис. 12.19).

Нетрудно заметить, что коэффициент бегущей волны и коэффициент стоячей волны связаны обратной пропорциональной зависимостью, т. е. $K_{\text{св}} = 1/K_{\text{бв}}$.

Поскольку $E_{\text{max}} = |E_{\text{n}}| + |E_{\text{o}}|$; $E_{\text{min}} = |E_{\text{n}}| - |E_{\text{o}}|$, то

$$K_{\text{св}} = \frac{|E_{\text{n}}| + |E_{\text{o}}|}{|E_{\text{n}}| - |E_{\text{o}}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad (12.44)$$

откуда модуль коэффициента отражения

$$|\Gamma| = \frac{K_{\text{св}} - 1}{K_{\text{св}} + 1}. \quad (12.45)$$

Совместное решение уравнений (12.43)...(12.45) позволяет определить активную R_{n} и реактивную X_{n} составляющие полного сопротивления Z_{n} нагрузки линии:

$$R_{\text{n}} = \frac{2K_{\text{св}}}{K_{\text{св}}^2 + 1 - (K_{\text{св}}^2 - 1)\cos\varphi} \rho; \quad (12.46)$$

$$X_{\text{n}} = \frac{(K_{\text{св}} - 1)\sin\varphi}{K_{\text{св}}^2 + 1 - (K_{\text{св}}^2 - 1)\cos\varphi} \rho; \quad (12.47)$$

$$Z_{\text{n}} = R_{\text{n}} + jX_{\text{n}}. \quad (12.48)$$

Способ измерительной линии

Способ заключается в измерении распределения напряженности электрического поля вдоль линии передачи мощности СВЧ с помощью измерительной линии с последующим определением измеряемых величин. Измерительные линии были первыми приборами, предназначенными для измерения параметров цепей с распределенными постоянными. Они позволяют измерять: длину волны λ ; затухание; фазу; коэффициент стоячих волн; полное сопротивление нагрузки.

Измерительные линии бывают волноводными, коаксиальными и полосковыми. Несмотря на ограниченные возможности автоматизации измерений измерительные линии продолжают оставаться традиционными измерительными приборами в диапазоне СВЧ, особенно при освоении как новых диапа-

зонов волн, так и новых конфигураций СВЧ-трактов и в ряде других практических случаев.

Устройство и принцип действия измерительной линии. Исследование распределения напряженности электрического поля вдоль линии передачи мощности СВЧ наиболее просто можно выполнить зондом, погружаемым в измерительную линию и перемещаемым вдоль нее. Для этого измерительная линия должна иметь продольную неизлучающую щель (рис. 12.20).

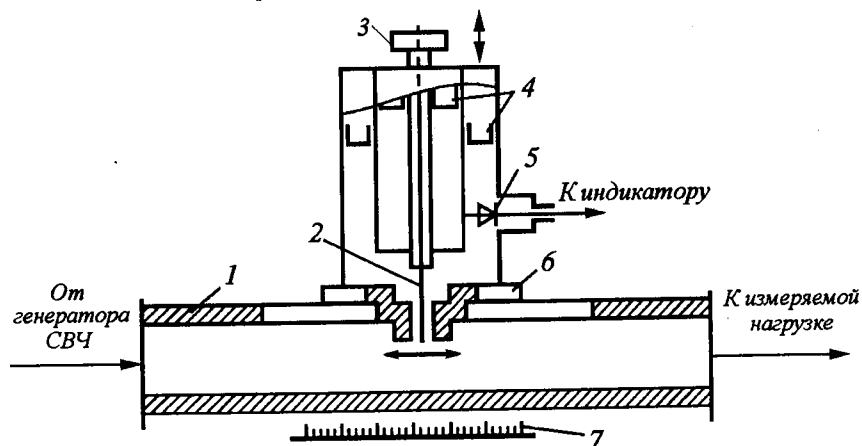


Рис. 12.20. Упрощенная конструкция измерительной линии

Зонд выполняет функции измерительной антенны и должен быть связан с детектором, выпрямленный ток (напряжение) которого характеризует напряженность поля в каждой точке линии. Таким образом, конструкция любой измерительной линии должна содержать следующие функциональные узлы: щелевую секцию, зондовую головку и каретку с механизмом перемещения зонда вдоль щелевой секции.

Щелевая секция волноводной измерительной линии состоит из отрезка стандартного прямоугольного волновода 1, оканчивающегося фланцами для подключения измерительного генератора и измеряемого СВЧ-элемента. Из теории СВЧ-устройств известно, что для поля волны H_{10} узкая продольная щель будет неизлучающей, если она прорезана точно посередине широкой стенки волновода. Длина щели зависит от диапазона частот измерения линии и должна быть достаточной для фиксации нескольких пучностей (максимальная амплитуда) и узлов (нулевая амплитуда) стоячей волны. Точность выполнения заданных размеров щелевой секции влияет на такие важные параметры измерительной линии, как затухание, собственный КБВ, непостоянство связи зонда с полем при его перемещении (за счет изменения глубины погружения).

Зондовая головка состоит из зонда 2, глубина погружения которого в линию может изменяться с помощью микрометрического винта 3, резонансной системы с настроечными поршнями 4 и СВЧ-диода 5, помещенного в специальную детекторную камеру.

В подавляющем большинстве современных измерительных линий применяются зонды емкостного типа, выполненные в виде тонкого вертикального штыря. Такой зонд реагирует на электрическую составляющую поля E в линии, причем наводимая ЭДС пропорциональна глубине его погружения в линию. Введение зонда в щель эквивалентно включению комплексной проводимости, реактивная составляющая которой искажает картину поля в измерительной линии и поэтому она должна быть скомпенсирована. Это достигается настройкой зондовой головки в резонанс с помощью специальной резонансной системы. В качестве такой системы в СВЧ-диапазоне применяют так называемый бикоаксиальный резонатор. Экран зонда и внутренняя поверхность среднего цилиндра образуют контур зонда, а внешняя поверхность цилиндра и внутренняя поверхность наружной трубы — контур СВЧ-детектора. Настройка измерительной линии производится с помощью поршней 4 до получения максимального тока (напряжения) детектора — СВЧ-диода 5.

Каретка 6 предназначена для перемещения зондовой головки вдоль линии и определения ее положения с помощью измерительной линейки 7 или индикатора другого типа. Это достаточно массивная плита, перемещаемая винтовым механизмом.

На точность измерения параметров нагрузки влияет ряд факторов: все узлы должны быть сочленены точно и без перекосов; выбрана оптимальная глубина погружения зонда, его связь с полем должна быть постоянной. При соблюдении этих условий погрешность измерения составляет 2...5 %.

Способ раздельного измерения падающей и отраженной волн

В ряде случаев достаточно знать только частотную характеристику коэффициента стоячей волны исследуемого СВЧ-элемента. Тогда целесообразно применять не очень сложные приборы, называемые *рефлектометрами* (т. е. измерителями раздельных сигналов). Эти приборы снабжаются ЭЛТ (или современным дисплеем), на экране которой отображается искомая характеристика в заданном частотном диапазоне; поэтому их называют *панорамными измерителями* или *панорамными рефлектометрами*. Подобные приборы выгодно отличаются от измерительных линий и обычных рефлектометров большей скоростью и удобством измерений, возможностью измерения полных сопротивлений, быстро меняющихся во времени и являющихся функцией частоты. Панорамные измерители используются также для измерения частотных характеристик ослабления СВЧ-четырёхполосников.

Упрощенная структурная схема панорамного рефлектометра показана на рис. 12.21. Работа такого измерителя основана на принципе раздельного вы-

деления сигналов, пропорциональных мощностям волн падающей от генератора и отраженной от исследуемого объекта (при измерении КСВ) или прошедшей через измеряемый объект (при измерении ослабления). На экране трубки воспроизводятся частотные характеристики $K_{св}$ и ослабления. Конструктивно панорамный измеритель состоит из СВЧ-генератора качающейся частоты (ГКЧ), направленных ответвителей мощности (НО1 и НО2), ориентированных на падающую и отраженную волны, двух детекторных головок (Д1 и Д2), измерителя отношений волн и осциллографического дисплея (ЭЛТ).

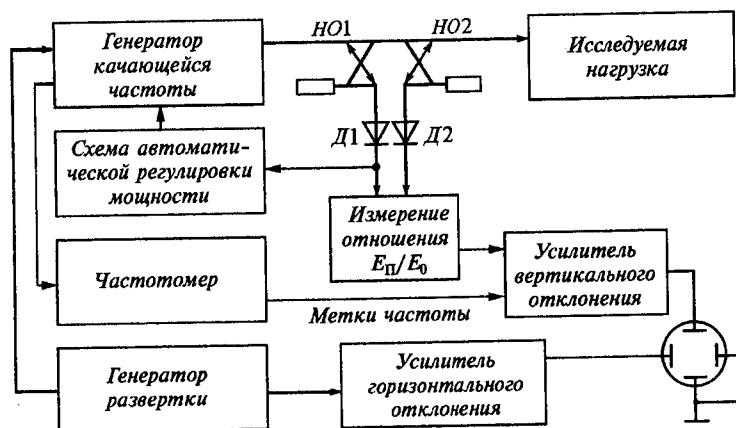


Рис. 12.21. Упрощенная структурная схема панорамного рефлектометра

Пилообразное напряжение генератора развертки модулирует напряжение ГКЧ и одновременно отклоняет луч ЭЛТ по горизонтали. Таким образом, ось абсцисс на экране является осью частот. Через направленные ответвители сигнал СВЧ проходит к нагрузке. Эти ответвители производят отбор мощности сигналов, пропорциональных значениям падающей и отраженной волн.

Выделенные направленными ответвителями падающая и отраженная волны, продетектированные соответствующими детекторными головками (с квадратичными детекторами), подаются на измеритель отношений E_{π}/E_0 . Выходное напряжение последнего пропорционально квадрату коэффициента отражения нагрузки и, следовательно, однозначно отражает значение КСВ. После усиления в усилителе вертикального отклонения это напряжение поступает в канал вертикального отклонения осциллографического устройства.

Поскольку напряжение генератора развертки, подводимое через усилитель к горизонтально отклоняющим пластинам ЭЛТ, изменяется синхронно с напряжением частотной модуляции, а значит, и с выходным колебанием генератора СВЧ, то на экране трубки наблюдается зависимость квадрата коэффициента отражения от частоты. Она дает общую картину изменения

КСВ, т.е. панораму. Изменение частоты колебаний ГКЧ можно контролировать по частотомеру.

Для повышения точности измерения предусмотрена автоматическая регулировка мощности (АРМ), с помощью которой поддерживается постоянной амплитуда сигнала ГКЧ.

Стабилизация мощности лежит в основе построения прямопоказывающих панорамных измерителей. Постоянство мощности необходимо поддерживать с точностью 1 %, и система стабилизации не должна быть инерционной. Устройства стабилизации мощности, представляющие собой схемы автоматического регулирования, бывают с внутренним и внешним управлением. Схема с внутренним управлением предполагает воздействие сигнала ошибок, снимаемых с детектора направленного ответвителя падающей мощности, непосредственно на ГКЧ. Действие схемы с внешним управлением, для которых характерно отсутствие паразитной частотной модуляции, основано на применении регулируемых элементов. Под воздействием сигналов ошибки они изменяют мощность в СВЧ-тракте.

Источниками погрешностей в панорамных рефлектометрах являются: нестабильность амплитуды падающей волны и неидентичность характеристик направленных ответвителей и детекторных головок. Рассогласование характеристик составляет 0,3...0,5 дБ. Верхняя граничная частота измерителя достигает 12,5 ГГц.

Автоматические микропроцессорные панорамные рефлектометры и измерители КСВ

Возможность выделения в рассмотренных приборах сигналов, несущих информацию об уровнях мощности падающей, отраженной или прошедшей через измеряемый объект волн, существующих в измерительном тракте, позволяет автоматизировать измерения КСВ и ослабления с помощью тех же технических решений, которые используются в измерителях АЧХ. После сравнения измерителей АЧХ и рефлектометра несложно представить себе работу панорамного измерителя КСВ и ослабления.

В настоящее время в основном применяются автоматические панорамные рефлектометры и измерители КСВ и ослабления, управляемые микропроцессором. Структурная схема такого прибора изображена на рис. 12.22. В измерителе применено двойное преобразование частоты и цифровое управление с помощью микропроцессора и принцип его действия можно коротко пояснить следующим образом.

Основным узлом измерителя является СВЧ-генератор качающейся частоты, вырабатывающий сверхвысокочастотное напряжение с постоянной амплитудой и меняющейся по заданному закону частотой. Выходной сигнал СВЧ-генератора через вентиль и усилитель поступает в измерительный тракт, содержащий два направленных ответвителя: падающей (П) волны и отраженной (О) волны, а также нагрузку — объект измерения. Постоянство

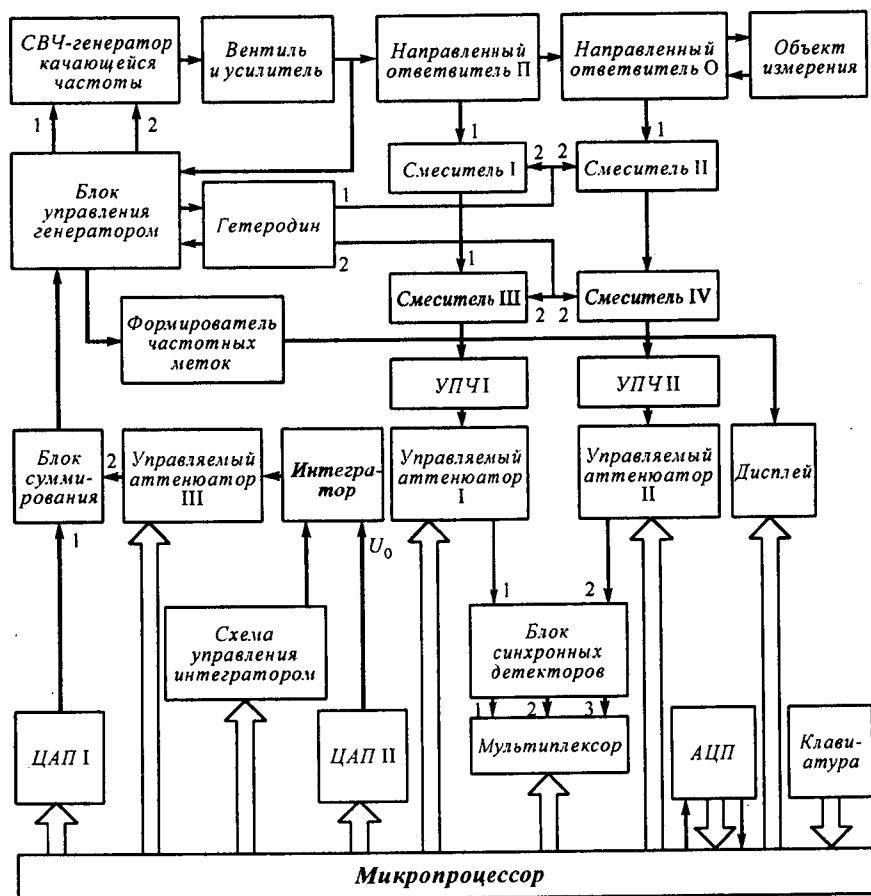


Рис. 12.22. Структурная схема автоматического микропроцессорного измерителя КСВ и ослабления

выходной мощности (амплитуды) СВЧ-генератора поддерживается блоком управления генератором, для чего на последний подается сигнал отрицательной ОС, снимаемый с выхода вентиль и усилителя.

Сигналы с ответвителей подаются на смесители I и II. Мощность сигнала на входе 1 смесителя I пропорциональна мощности падающей волны $P_{\text{пад}}$, а мощность сигнала на входе 1 смесителя II — мощности отраженной волны $P_{\text{отр}}$. К входам 2 смесителей подводится СВЧ-сигнал частотой f_r с выхода 1 перестраиваемого гетеродина, имеющего такие же характеристики, как и СВЧ-генератор качающей частоты. При преобразовании частоты в смесителях на их выходах образуются сигналы первой промежуточной частоты $f_{\text{упч}} = f_c - f_r$, значение которой приблизительно на два порядка ниже значения

частоты сигнала основного СВЧ-генератора. Мощности выходных сигналов смесителей I и II пропорциональны $P_{\text{пад}}$ и $P_{\text{отр}}$ соответственно.

Для сохранения в выходных сигналах амплитудных и фазовых соотношений, присущих входным сигналам, характеристики преобразователей частоты на смесителях I и II должны обладать высокой линейностью. Это достигается тем, что смесители работают в режиме, при котором мощность гетеродина в 5...10 раз больше мощности преобразуемых сигналов. Для поддержания постоянным значения промежуточной частоты $f_{\text{упч}}$ применена фазовая автоподстройка частоты гетеродина (синхронизирующие сигналы на него подаются из блока управления генератором).

Со смесителей I и II выходные сигналы поступают на входы 1 смесителей III и IV, к входам 2 которых подключен выход 2 гетеродина. Значение частоты сигнала на выходе 2 гетеродина в $m = 250 \dots 500$ раз ниже значения частоты f_r на его основном выходе. После преобразования частоты на выходах смесителей III и IV получаются сигналы, значения частот которых сравнительно мало (например, $f'_{\text{упч}} = 100$ кГц). Они через управляемые аттенуаторы I и II подаются в блок синхронных детекторов, состоящий из трех синхронных детекторов с RC-фильтрами в выходной цепи, и фазосдвигающей цепи, осуществляющей фазовый сдвиг на 90° .

Из теории детектирования сигналов известно, что на входы синхронного детектора подаются сигналы с синхронной (одинаковой) частотой: на один вход — исследуемый сигнал $u_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \sin(\omega t + \varphi_1)$, а на другой — опорное напряжение $u_{\text{оп}} = U_{\text{оп}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{оп}})$. Выходное напряжение синхронного детектора $u_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cos \varphi$, где $\varphi = \varphi_1 - \varphi_{\text{оп}}$ — фазовый сдвиг между напряжениями исследуемого и опорного сигналов, а постоянное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально амплитуде исследуемого сигнала.

В схеме автоматического измерителя (рис. 12.22) в качестве опорного используется сигнал фиксированной амплитуды (ее значение можно принять за единицу), поступающий с выхода УПЧ I (из канала падающей волны) через управляемый аттенуатор I на вход 1 блока синхронных детекторов. Исследуемым сигналом для первого синхронного детектора является сигнал канала падающей волны (выхода УПЧ I), а для второго и третьего детекторов — сигнал, поступающий через управляемый аттенуатор II на вход 2 блока синхронных детекторов из канала отраженной волны (выхода УПЧ II). При этом опорный сигнал третьего синхронного детектора сдвинут по фазе на 90° относительно опорного сигнала первого и второго детекторов с помощью (встроенной внутри блока) фазосдвигающей цепи.

Итак, напряжения постоянного тока на выходах всех синхронных детекторов описываются такими выражениями: $u_{\text{вых1}} = k_1 U_{\text{пад}}$; $u_{\text{вых2}} = k_2 U_{\text{отр}} \cos \varphi$; $u_{\text{вых3}} = k_3 U_{\text{отр}} \sin \varphi$, где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты преобразования детекторов.

Сигналы с выходов всех синхронных детекторов с помощью мультиплексора поочередно подключаются к сигнальному входу АЦП (номер под-

ключаемого детектора определяется цифровым кодом, подаваемым на мультиплексор из микропроцессорной системы). Поступающее на АЦП напряжение преобразуется в числовой эквивалент, который фиксируется в ОЗУ микропроцессорной системы по определенному адресу.

Микропроцессор выполняет вычислительные и управляющие функции. Первые из них сводятся к вычислению модуля и фазы коэффициента отражения по значениям напряжений $U_{\text{вых1}}$, $U_{\text{вых2}}$, $U_{\text{вых3}}$, а также значения КСВ. К управляющим функциям микропроцессора относятся: установка начального и конечного значений частот полосы качания и линейное качание частоты основного СВЧ генератора, автоматическая калибровка измерителя в режимах короткого замыкания и холостого хода, выдача графической и цифровой знаковой информации на дисплей, управление положением фазовой характеристики на экране дисплея и т.д.

Для установки начального и конечного значения частот полосы качания основного генератора на клавиатуре набирают нужные коды. При этом на входы ЦАП I из микропроцессора подается определенное число (цифровой код), которому соответствует фиксированное значение постоянного напряжения на выходе ЦАП I. Оно поступает на вход 1 блока суммирования и передается через него и через блок управления генератором на вход 1 СВЧ-генератора качающейся частоты, в результате чего устанавливается требуемое начальное значение полосы качания.

Линейно изменяющееся напряжение с выхода интегратора через управляемый аттенуатор III подводится к входу 2 блока суммирования, и также через блок управления генератором подается на СВЧ-генератор, осуществляя частотную модуляцию его выходного сигнала по линейному закону, т.е. линейное качание частоты. Крутизна нарастания выходного напряжения интегратора зависит от значения напряжения U_0 на его входе. В рассматриваемом измерителе U_0 — значение постоянного напряжения на выходе ЦАП II. Оно определяется цифровым кодом, поступающим на входы ЦАП II из микропроцессора. Продолжительность действия напряжения U_0 на входе интегратора задается схемой управления интегратором в соответствии с командами, подаваемыми микропроцессором на ее цифровой вход.

Полоса качания (девиация частоты) СВЧ-генератора зависит от амплитуды напряжения, подводимого с интегратора. Следовательно, изменять полосу качания можно коэффициентом передачи управляемого аттенуатора III, значение которого определяется цифровым кодом, поступающим на аттенуатор с микропроцессора.

Для получения на экране кривой, отображающей зависимость КСВ от частоты, в дисплей встроен генератор развертки, выполненный на основе ЦАП, управляемого микропроцессором.

В схеме автоматического измерителя имеется формирователь частотных меток. С его помощью на экране дисплея получают яркостные метки, рас-

стояние между которыми по горизонтальной оси соответствует определенному значению частоты.

Автоматическая калибровка измерителя КСВ производится в режиме короткого замыкания основного СВЧ-тракта. Для этого при отключенном объекте измерения выход тракта замыкается накоротко. Если каналы падающей и отраженной волн идентичны, то значения напряжений на входах 1 и 2 блока синхронных детекторов будут равны. Если же при калибровке это не устанавливается, то коэффициенты передачи указанных каналов выравниваются с помощью управляемых аттенуаторов I и II согласно цифровым кодам, подводимым из микропроцессора к их цифровым входам.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры электрических цепей считаются сосредоточенными, а какие распределенными?
2. Перечислить методы измерения активных сопротивлений, дать краткую характеристику этим методам.
3. Мостовые методы измерения на переменном и постоянном токе. Чем отличаются условия равновесия четырехплечего моста на переменном токе от условия равновесия на постоянном токе?
4. Приведите схемы мостов для измерения параметров L , C , R и $\operatorname{tg} \delta$.
5. Нарисовать упрощенную функциональную схему куметра и объяснить его принцип действия.
6. Какие методы измерения параметров длинных линий используются в цифровых приборах?
7. Как производится исследование АЧХ линейных цепей?
8. Какие методы измерения параметров используются в диапазоне СВЧ?
9. Какая связь существует между режимом работы и нагрузкой в передающей линии СВЧ? Привести примеры.
10. Для чего служит измерительная линия?
11. Каково устройство волноводной линии и каков принцип ее действия?
12. Как определяется фаза коэффициента отражения с помощью измерительной линии?
13. Как вычисляется модуль коэффициента отражения?
14. Для чего предназначен рефлектометр?
15. Объяснить работу панорамного измерителя КСВ и ослабления по упрощенной структурной схеме.
16. Пояснить принцип действия автоматического микропроцессорного измерителя КСВ и ослабления.

Глава 13. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

В радиотехнике большую роль играют случайные процессы: напряжение собственных шумов радиотехнической аппаратуры, сигналы других радиосистем, шумовые сигналы, сигналы речи и т. д. Анализ различных задач радиотехники показывает, что практически любой сигнал, несущий информацию, можно рассматривать как случайный (стохастический). Функционирование различных радиотехнических устройств и систем при наличии помех, разработка помехоустойчивой радиоаппаратуры, измерение слабых сигналов на фоне шумов неразрывно связаны с определением и измерением разнообразных характеристик случайных процессов. Приборы для измерения подобных характеристик находят широкое применение не только в исследовательских целях, но и при решении многих практических задач.

13.1. Общие сведения

Изучение радиотехнических случайных процессов требует применения статистических методов анализа. При статистическом подходе нет необходимости определять точный результат отдельного опыта или измерения, а можно основываться на исследовании множества опытов. При рассмотрении множества опытов удастся найти закономерности и количественные соотношения, характеризующие случайный процесс в среднем. Если повторять наблюдения (измерения) в течение длительного времени (или другим измерительным прибором аналогичного типа), численные значения измеренной величины будут иные, т.е. они также являются случайными величинами.

Совокупность отдельных наблюдений в теории случайных процессов называются *ансамблем реализаций*. Ансамбль реализаций — математическая абстракция, аналитическая модель случайного процесса. Конкретные реализации, наблюдаемые при исследованиях, представляют собой физические процессы, явления или объекты и входят в ансамбль как его неотъемлемая часть. Например, ансамблем реализаций случайного процесса является группа сигналов, наблюдаемых одновременно на выходах идентичных генераторов шумового напряжения.

Ансамбль реализаций случайного процесса является основным экспериментальным материалом, на основе которого можно получить его характеристики и параметры.

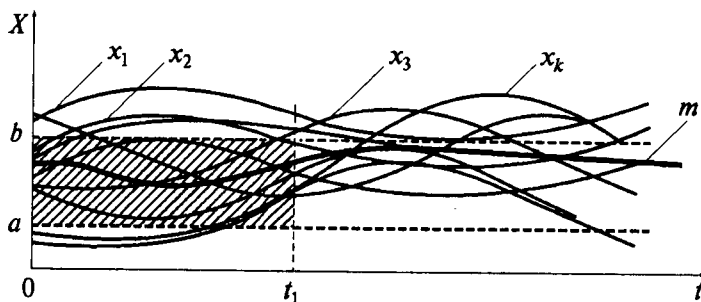


Рис. 13.1. Ансамбль реализаций случайного процесса

На рис. 13.1 показан некий условный ансамбль реализаций случайных функций. Однако этот ансамбль случайных функций получен в результате измерения *неслучайной функции* и после обработки данных ансамбля необходимо иметь сведения об истинном (неслучайном) значении измеряемой случайной функции $X(t)$.

Вероятностные характеристики случайных процессов

Пусть случайный процесс описан некоторой обобщенной случайной функцией $X(t)$. Конкретный вид $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_k(t)$, ... этой функции процесса, полученной в результате проведенного эксперимента (например, измерения), позволяет определить все ее параметры и она является уже (в некоторой мере условно) *детерминированным сигналом*. Следовательно, случайная функция $X(t)$ совмещает в себе характерные признаки случайной величины и детерминированной функции. При фиксированном значении аргумента t она превращается в случайную величину, а в результате каждого отдельного опыта становится детерминированной функцией.

Выберем некоторый момент времени t_1 . Совокупность отдельных мгновенных значений всех реализаций ансамбля в заданный момент времени t_1 также будет некоторой случайной величиной $X(t_1)$, называемой *сечением случайного процесса*. Эта случайная величина может иметь любые заранее неизвестные значения в возможном интервале ее изменения. Случайные величины и их характеристики были уже представлены при изучении случайных погрешностей измерения. Кратко напомним некоторые из них.

Достаточно полной характеристикой случайной величины $X(t_1)$ является *интегральная функция распределения* $F(x)$. Эта функция определяется как вероятность того, что все значения случайной величины $X(t_1)$ не превышают некоторого заданного уровня переменной x :

$$F(x) = P[X(t_1) < x], \quad (13.1)$$

где P — символ, характеризующий вероятность события.

Интегральная функция распределения определяется на интервале $0 \leq F(x) \leq 1$.

Если случайная величина $X(t_1)$ является непрерывной во времени, то удобнее пользоваться производной функции распределения — *одномерной плотностью распределения вероятности*:

$$p(x, t_1) = \frac{dF}{dx}. \quad (13.2)$$

Зададим какой-либо интервал a, b изменения параметра x случайной величины $X(t_1)$ (см. рис. 13.1). Тогда из формулы (13.2) следует, что значение

$$p(x, t_1)dx = F(b) - F(a) = P[a < X(t_1) < b] \quad (13.3)$$

есть вероятность попадания случайной величины $X(t_1)$ в заданный интервал a, b .

Пусть параметр $a \rightarrow -\infty$, а параметр b принимает текущее значение переменной x . Тогда интегральная функция распределения случайного процесса

$$F(x) = P[-\infty < X(t_1) < x] = \int_{-\infty}^x p(x, t_1)dx. \quad (13.4)$$

Одномерная плотность вероятности неотрицательная величина и площадь под кривой $p(x, t_1)$ равна единице.

Числовые характеристики случайных процессов

Случайные процессы наиболее полно описываются законами распределения плотности вероятности: одномерным, двумерным и т. д. Однако оперировать с такими, в общем случае многомерными функциями очень сложно, поэтому в инженерных приложениях, к каким относится метрология, стараются обойтись характеристиками и параметрами этих законов, которые описывают случайные процессы не полностью, а частично. К важнейшим из них относятся математическое ожидание и дисперсия.

Измерение параметров и характеристик случайного процесса существенно упрощается при его стационарности и эргодичности.

Стационарными называют случайные процессы, статистические характеристики которых не изменяются во времени. Проще говоря, к стационарным относятся случайные процессы, протекающие во времени однородно, частные реализации которых с постоянной амплитудой колеблются вокруг некоторой средней функции. Свойства стационарных процессов характеризуются следующими условиями:

- математическое ожидание стационарного случайного процесса постоянно, т.е. $m_x(t) = m_x = \text{const}$; однако это требование не является существенным, поскольку от случайной функции $X(t)$ всегда можно перейти к централизованной функции, для которой математическое ожидание равно нулю (*центрированные* случайные процессы); отсюда вытекает то, что если случайный про-

цесс нестационарен только за счет переменного во времени математического ожидания, то операция центрирования его сводит к стационарному;

- для стационарного случайного процесса дисперсия по сечениям является постоянной величиной, т.е. $D_x(t) = D_x = \text{const}$.

Практически все реальные радиотехнические случайные процессы относятся к стационарным. Подавляющее большинство стационарных случайных процессов обладают свойством *эргодичности*, при котором усреднение по ансамблю реализаций можно заменить усреднением по времени одной реализации в пределах бесконечно длинного интервала T_x . Проще говоря, для стационарного эргодического случайного процесса любая его реализация достаточной продолжительности является как бы «полномочным представителем» всей совокупности реализаций процесса.

Итак, для стационарного случайного процесса характерна вероятностная эквивалентность всех временных сечений ансамбля реализаций, для эргодического — вероятностная эквивалентность всех реализаций, входящих в ансамбль.

В радиотехнике возможны и другие виды случайных процессов. *Стационарный неэргодический* процесс — это случайный процесс, у которого эквивалентны временные сечения (вероятностные характеристики не зависят от времени), но не эквивалентны реализации (вероятностные характеристики зависят от номера реализации). У *нестационарного эргодического* случайного процесса эквивалентны реализации (вероятностные характеристики не зависят от номера реализации), но не эквивалентны сечения по времени (вероятностные характеристики зависят от текущего времени). *Нестационарный неэргодический* — это случайный процесс, у которого не эквивалентны ни временные сечения, ни реализации. Итак, классификация на основе стационарности и эргодичности дает четыре класса случайных процессов: стационарные эргодические, стационарные неэргодические, нестационарные эргодические, нестационарные неэргодические.

В практической радиотехнике приходится иметь дело со всеми перечисленными классами случайных процессов. В большинстве случаев представляет интерес измерение вероятностных характеристик стационарных эргодических процессов, что и рассматривается далее.

Определим основные числовые характеристики *стационарного эргодического* случайного процесса.

Математическое ожидание (среднее значение) случайного процесса вычисляют путем усреднения (эта операция обозначена чертой над соответствующей функцией) значений заданной реализации (жирная линия, обозначенная как m на рис. 13.1)

$$m_x = \overline{x(t)} = \lim_{T_x \rightarrow \infty} \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} x(t) dt. \quad (13.5)$$

Дисперсия случайного процесса, как уже отмечалось ранее,

$$D = \sigma_x^2 = \lim_{T_x \rightarrow \infty} \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} [x(t) - m_x]^2 dt = \overline{x^2(t) - m_x^2} \quad (13.6)$$

определяет мощность флуктуаций.

Параметр $\sigma_x = \sqrt{D_x}$ есть *среднее квадратическое отклонение* (СКО).

Как уже отмечалось, на практике вместо среднего значения, а также дисперсии и среднего квадратического отклонения результата измерений находят лишь их оценки, которые обозначают соответственно как m_x^* , D_x^* и σ_x^* .

В теоретической радиотехнике различают две основные группы статистических характеристик, содержащих информацию о случайном процессе:

- распределение значений процесса во времени (математическое ожидание, дисперсия, функция распределения, функция корреляции);
- распределение энергии процесса по частоте (спектральная плотность).

В принципе истинные характеристики случайных процессов, определяемые в большинстве случаев как интегралы по бесконечным пределам, можно найти на основании бесконечно большого количества их возможных реализаций или в случае эргодичности — на основании одной реализации бесконечной длительности. Реально можно наблюдать только ограниченные выборки, т. е. конечный ансамбль реализации или реализацию конечной длительности. Поэтому задача измерений состоит в том, чтобы найти оценки характеристик случайного процесса на основании конечной выборки. Эти оценки называют *выборочными*.

Для измерения вероятностных характеристик случайных процессов характерно наличие систематической погрешности, обусловленной конечностью объема выборочных данных о мгновенных значениях реализации. Погрешность этого вида часто называют методической. Чтобы измерить отдельные вероятностные характеристики случайных процессов, применяют приборы, предназначенные для измерения математического ожидания (среднего) и дисперсии напряжения или тока. Для измерения математического ожидания применяют в основном цифровые интегрирующие приборы, а для измерения дисперсии — приборы, показания которых определяются средним квадратическим значением входного процесса.

13.2. Измерение математического ожидания и дисперсии

Оценка математического ожидания. Усредняющее устройство, выполняющее функции согласно формуле (13.5), является идеальным интегратором. Если функция $X(t)$ представляет ток или напряжение, то в роли аналогового интегратора могут выступать интегрирующие RC-цепочки или интег-

рирующее устройство, построенное на основе операционного усилителя (ОУ), охваченного глубокой отрицательной обратной связью (рис. 13.2).

С помощью электронного ключа $Kл$ задается время интегрирования (опроса) входного сигнала $T_{оп} = T_x$. При $t = 0$ ключ замыкается и находится в этом положении до момента $t = T_{оп}$, после чего замыкается. За время $T_{оп}$ осуществляется усреднение входного сигнала $u_{вх}(t)$. Через замкнутый ключ и ОУ конденсатор разряжается практически мгновенно. Для получения оценки среднего значения исследуемого напряжения $u(t)$ необходимо измерить выходное напряжение $u_{вых}(T_{оп}) = m_x^*$ на интервале времени $T_{оп}$.

Среднее значение входного напряжения определится как (формула приведена без вывода):

$$m_x^* = K u_{вх}(T_{оп}), \quad (13.7)$$

где K — коэффициент усиления усилителя, входящего в схему.

Оценка дисперсии. Для измерения оценки дисперсии в соответствии с формулой (13.6) может использоваться вольтметр, имеющий квадратичный преобразователь, т. е. определять среднее квадратическое значение. Такой вольтметр должен отвечать следующим требованиям:

- иметь «закрытый вход», т. е. не пропускать постоянную составляющую для получения центрированной величины;
- обладать большой протяженностью квадратичного участка характеристики детектора, так как измеряемые напряжения могут отличаться большими величинами от отношения пикового значения к среднему квадратическому значению;
- иметь высокую чувствительность в широком диапазоне исследуемых частот.

Цифровые измерители математического ожидания и дисперсии

При измерении оценок математического ожидания и дисперсии цифровыми приборами интегралы в формулах (13.5) и (13.6) заменяют суммами:

$$m_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(iT_{оп}); \quad (13.8)$$

$$D_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x(iT_{оп}) - m_x^*]^2. \quad (13.9)$$

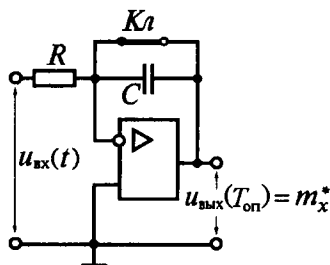


Рис. 13.2. Схема интегратора на ОУ с емкостной обратной связью

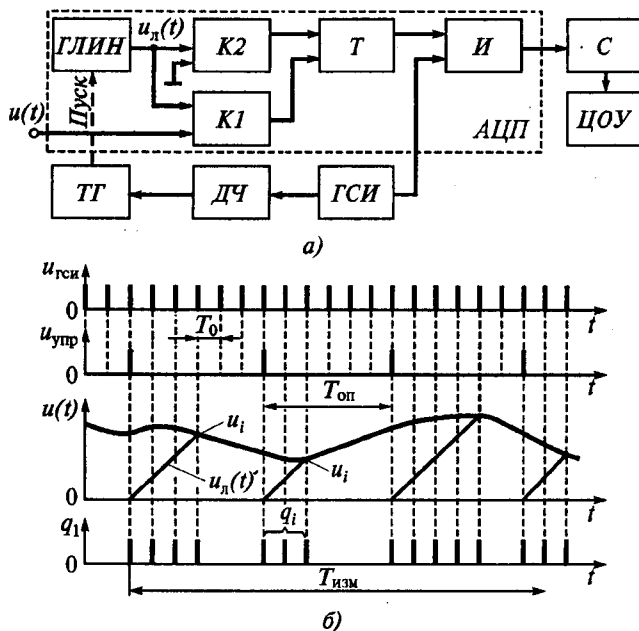


Рис. 13.3. Цифровой измеритель математического ожидания:
а — упрощенная структурная схема; б — временные диаграммы

Здесь $T_{изм}$ — заданный интервал времени измерения; $n = T_{изм} / T_{оп}$ — общее количество выборок за время измерения.

Упрощенная структурная схема цифрового измерителя математического ожидания (точнее его оценки) и временные диаграммы, поясняющие его работу, представлены на рис. 13.3, а, б.

Режим функционирования прибора задается тактовым генератором (ТГ), который управляет работой генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН). Этот генератор входит в состав времяимпульсного АЦП, принцип действия которого был описан при рассмотрении цифровых вольтметров. На временных диаграммах показаны сигналы, действующие в схеме цифрового измерителя. Отметим, что здесь и далее в качестве исследуемой величины $x(t)$ рассматривается напряжение $u(t)$.

Управление схемой осуществляет генератор счетных импульсов (ГСИ). Напряжение $u_{гси}$ (импульсы, следующие с частотой $f_0 = 1/T_0$) ГСИ одновременно поступает на один из входов схемы И и делитель частоты (ДЧ). Коэффициент k_d деления выбирается кратным десяти: $k_d = 10^\beta$, где β — целое число. Полученный в результате интервал опроса:

$$T_{оп} = k_d T_0 = 10^\beta T_0.$$

Импульсы управления $u_{\text{упр}}$ (опорные импульсы), поступающие с периодом повторения $T_{\text{оп}}$ с тактового генератора, командой *Пуск* запускают генератор линейно изменяющегося напряжения, сигнал $u_d(t)$ которого сравнивается с исследуемым входным сигналом $u(t)$ в компараторе К1. Одновременно с началом работы ГЛИН другой компаратор К2 подает разрешающий сигнал на вход триггера Т, и на обоих входах схемы И появляются сигналы, в результате чего от начала команды *Пуск* импульсы ГСИ попадают на счетчик (С). Процесс подсчета импульсов ГСИ прекратится, когда с компаратора К1 поступит сигнал, опрокидывающий триггер Т. Это произойдет в момент сравнения напряжения $u_d(t)$, вырабатываемого ГЛИН, с входным напряжением u . После окончания времени цикла $T_{\text{оп}}$, с приходом следующего опорного импульса $u_{\text{упр}}$, снова произойдет запуск ГЛИН и в счетчик будут записываться данные следующего цикла и т. д.

Если запрограммировано n циклов измерений, то общее количество импульсов, записанное счетчиком за время измерения $T_{\text{изм}}$, будет:

$$N = \sum_{i=1}^n q_i, \quad (13.10)$$

где q_i — число импульсов за время опроса.

В свою очередь, $q_i = C u_i$, тогда:

$$N = C \sum_{i=1}^n u_i = C n m_x^*, \quad (13.11)$$

где C — константа, коэффициент пропорциональности; u_i — значение входного напряжения в момент сравнения.

Среднее значение (оценка) исследуемого напряжения

$$m_x^* = N / (Cn). \quad (13.12)$$

Подсчитанное значение оценки среднего отражается на дисплее цифрового отсчетного устройства (ЦОУ).

При определении дисперсии необходимо произвести центрирование среднего значения

$$\dot{u}(t) = u(t) - m_x^*,$$

а затем возвести в квадрат полученную величину. Структурная схема цифрового измерителя дисперсии представлена на рис. 13.4.

С помощью центрирующего устройства (ЦУ) из исследуемого сигнала выделяется его переменная составляющая $\dot{u}(t)$, которая поступает на двухполупериодный выпрямитель (В).

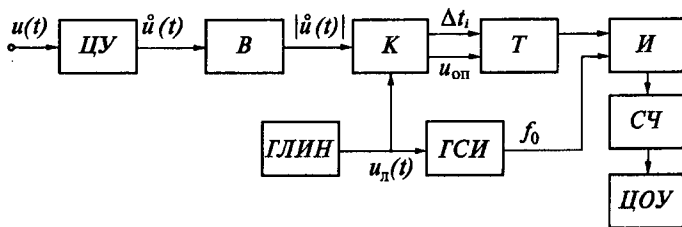


Рис. 13.4. Структурная схема цифрового измерителя дисперсии

Компаратором (К) выпрямленный сигнал $|\dot{u}(t)|$ преобразуется во временной интервал Δt_i путем сравнения его с линейно изменяющимся напряжением $u_n(t) = k_1 t$ (k_1 — коэффициент преобразования ГЛИН), которое вырабатывается ГЛИН. В результате этого преобразования получим временной интервал, описываемый уравнением:

$$\Delta t_i = k_2 \left| \dot{u}(t) \right|_i^2, \quad (13.13)$$

где k_2 — коэффициент преобразования компаратора.

Напряжение ГЛИН $u_n(t)$ управляет и частотой генератора счетных импульсов (ГСИ), которая определяется как $f_0 = 1/T_0 = k_3 u_n(t)$; здесь k_3 — коэффициент преобразования ГСИ. Счетные импульсы поступают на вход схемы совпадения И, на другой вход которой через триггер (Т) подается импульс длительности Δt_i . Триггер открывается напряжением $u_{оп}$, которое действует на интервале $T_{оп}$. Итак, на вход счетчика импульсов (СЧ) за интервал длительности очередного импульса Δt_i с ГСИ через схему И пройдет некоторое число импульсов:

$$q_i = \int_0^{\Delta t_i} f_0 dt = \int_0^{\Delta t_i} k_3 u_n(t) dt = \int_0^{\Delta t_i} k_3 k_1 t dt = k_4 \Delta t_i = k_0 \left| \dot{u}(t) \right|_i^2, \quad (13.14)$$

где $k_4 = k_1 k_3$; $k_0 = k_4 k_2 = k_1 k_2 k_3$.

Следовательно, за время измерения $T_{изм} = n T_{оп}$ (здесь $T_{оп}$ и n имеют те же значения, что и в схеме измерения m_x^*), в счетчике регистрируется число

$$N = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n k_0 \left| \dot{u}(t) \right|_i^2 = k_0 n D_x^*. \quad (13.15)$$

Разделив число N импульсов на $k_0 n$, получим значение оценки дисперсии случайного процесса:

$$D_x^* = \sigma_x^{*2} = N / (k_0 n). \quad (13.16)$$

Цифровой измеритель дисперсии случайного процесса также управляется импульсами тактового генератора, для упрощения на рис. 13.4 не показанного. Поэтому напряжение $u_{оп}$ в схеме — импульсный сигнал тактового генератора. Полученные результаты измерения отображаются на табло ЦОУ.

Основными погрешностями измерения при определении и оценки среднего и дисперсии случайного процесса являются погрешности, связанные с конечностью времени усреднения (измерения) $T_{изм}$.

13.3. Измерение распределения вероятностей

Для радиотехники особый интерес представляют интегральная функция распределения и распределение плотности вероятности. Анализ распределения вероятностей предусматривает получение кривых распределения для различных значений аргумента. В приборах для измерения (оценки) интегральной функции $F(x)$ и плотности вероятности $p(x)$ используются методы, основанные на связи между функциями вероятностей и временем пребывания стационарного эргодического процесса в интервале заданных значений x .

Измерение интегральной функции распределения. Оценку интегральной функции распределения можно проиллюстрировать с помощью рис. 13.5, где представлены соответственно структурная схема измерителя и графики, поясняющие ее работу.

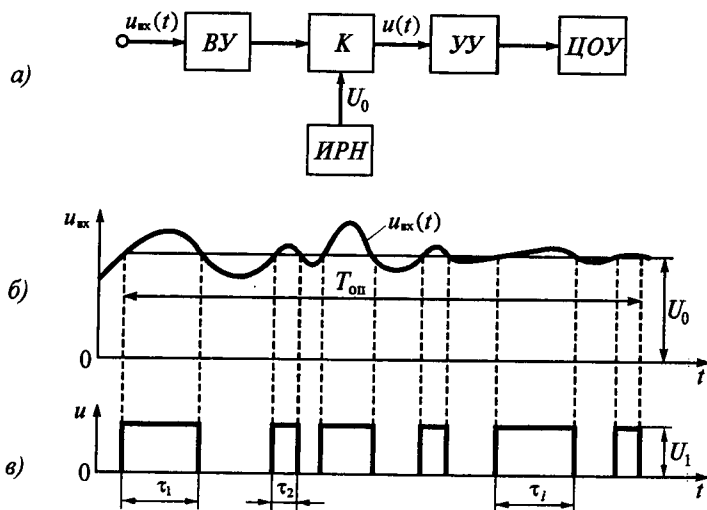


Рис. 13.5. Измерение функции распределения вероятностей:

a — структурная схема; b — время пребывания реализации выше уровня анализа; $в$ — импульсы на выходе компаратора

Структурная схема (рис. 13.5, а) содержит входное устройство (ВУ), компаратор (К), источник регулируемого напряжения (ИРН), усредняющее устройство (УУ) и цифровое отсчетное устройство (ЦОУ). Анализируемый сигнал (реализация) $u_{\text{вх}}(t)$ (рис. 13.5, б) через входное устройство, обеспечивающее необходимую интенсивность исследуемого процесса на входе основных блоков, подается на компаратор. Компаратор выполняет роль *амплитудного селектора* с определенным порогом срабатывания U_0 , устанавливаемого источником регулируемого напряжения.

При срабатываниях компаратора на его выходе возникает последовательность импульсов $u(t)$ постоянной амплитуды U_1 и случайной длительности τ_i , которая в каждом случае пропорциональна времени пребывания анализируемой функции выше установленного значения порогового напряжения U_0 (рис. 13.5, в). Полученные импульсы поступают на усредняющее устройство, которое осуществляет усреднение за время измерения (обозначим его как $T_{\text{изм}} = T_{\text{оп}}$). Это устройство может быть выполнено в виде интегратора или фильтра низких частот.

Среднее значение напряжения на выходе усредняющего устройства, отнесенное к амплитуде напряжения импульсов U_1 , соответствует алгоритмам (13.1), (13.4), определяющим характер изменения интегральной функции распределения. Вычислив таким образом некую вспомогательную функцию на выходе УУ

$$F_1 = \frac{U_1}{T_{\text{оп}}} \sum_{i=1}^n \tau_i = U_{\text{ср}} = P[u(t) > U_0],$$

можно подсчитать и оценку интегральной функции распределения:

$$F(u) = 1 - F_1 = 1 - P[u(t) > U_0] = P[u(t) < U_0]. \quad (13.17)$$

Сигнал с выхода устройства усреднения поступает на ЦОУ. В качестве ЦОУ применяют цифровые измерители интервалов времени, которые определяют сумму длительностей импульсов за время усреднения $T_{\text{оп}}$. Если произвести измерения, меняя пороговое значение U_0 , то получим график функции распределения.

Измерение плотности вероятности. Плотность распределения вероятности анализируют с помощью устройства (рис. 13.6, а), содержащего два одинаковых канала, подобных каналу схемы рис. 13.5, а. В обоих каналах измерителя устанавливают уровни селекции по напряжению U_0 и $U_0 + \Delta U$.

В этой схеме, как и в схеме на рис. 13.5, а: ВУ — входное устройство; К1, К2 — компараторы; ИРН — источник регулируемого напряжения, вырабатывающий фиксированные уровни напряжений U_0 и $(U_0 + \Delta U)$; УУ — усредняющее устройство; ЦОУ — цифровое отсчетное устройство. Кроме того в схему измерителя входят формирующие устройства (ФУ1, ФУ2) и схема вычитания (СВ).

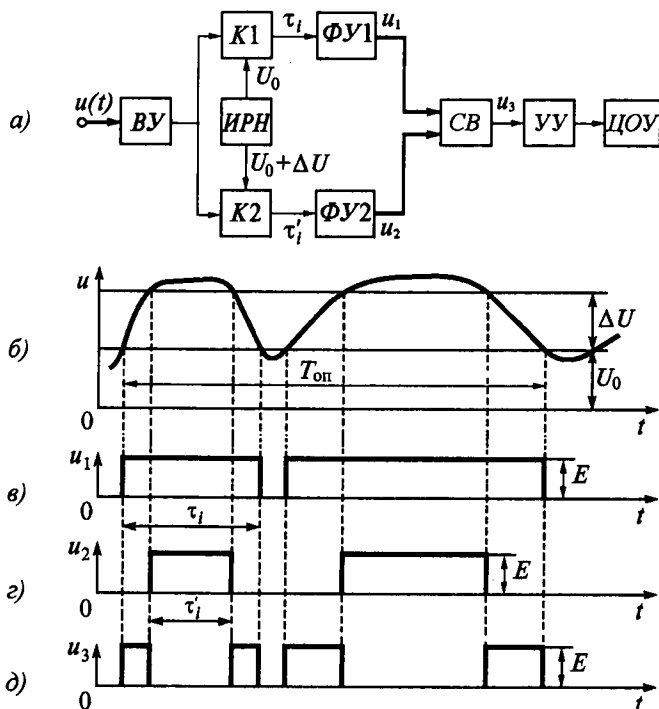


Рис. 13.6. Определение плотности вероятности:

a — структурная схема; *б* — время пребывания реализации в заданном интервале; *в* — импульсы $\Phi У1$; *г* — импульсы $\Phi У2$; *д* — напряжение на выходе СВ

Графики, поясняющие принцип определения одномерной плотности вероятности случайного процесса с помощью временных интервалов, представлены на рис. 13.6, б–д.

Исследуемая реализация $u(t)$ (рис. 13.6, б) через входное устройство поступает на компараторы K1 и K2. На выходе компаратора K1 формируются импульсы напряжения, длительность которых τ_i соответствует интервалам времени, когда $u(t) > U_0$. Для компаратора K2 длительность τ'_i импульсов соответствует интервалам времени, когда $u(t) > U_0 + \Delta U$. Далее импульсы обоих каналов поступают на формирующие устройства $\Phi У1$ и $\Phi У2$, на выходе которых появляются стабильные импульсные напряжения u_1 и u_2 (рис. 13.6, в, г).

Схема вычитания вырабатывает разностное напряжение между каналами: $u_3 = u_1 - u_2$. Длительность импульсов выходного напряжения u_3 схемы вычитания (рис. 13.6, д) соответствует интервалам времени, когда $U_0 < u(t) < (U_0 + \Delta U)$. Усреднение этих импульсов за время накопления определяет некоторый уро-

вень напряжения, соответствующий оценке плотности вероятности процесса. Итак, можно считать, что напряжение на выходе усредняющего устройства дает оценку значения плотности вероятности $p_{T_{\text{оп}}}(U_0)$. Индекс « $T_{\text{оп}}$ » указывает на то, что оценка получена при конечном времени усреднения и не равна точно значению плотности вероятности. Меняя пороговый уровень U_0 , можно получить зависимость плотности вероятности $p_{T_{\text{оп}}}(u)$.

В соответствии с определением плотности вероятности (13.2), (13.3) для некоторого интервала наблюдения $T_{\text{оп}}$:

$$p(u)\Delta u = P[U_0 < u(t) < (U_0 + \Delta U)] = \frac{E}{T_{\text{оп}}} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \tau'_i). \quad (13.18)$$

Нетрудно показать, что здесь:

$$\frac{1}{T_{\text{оп}}} \sum_{i=1}^n \tau_i = P[u(t) > U_0]; \quad \frac{1}{T_{\text{оп}}} \sum_{i=1}^n \tau'_i = P[u(t) > (U_0 + \Delta U)].$$

Если выходные импульсы компараторов К1 и К2 использовать для подключения генератора образцовой частоты к суммирующему и вычитающему входам реверсивного счетчика соответственно, то последний в этом случае будет выполнять операции вычитания и интегрирования, заменяя узлы схемы ФУ1, ФУ2, СВ.

Итак, производя измерения, соответствующие различному значению уровня порога U_0 , на основании формул (13.17) и (13.18) можно построить кривые оценки интегральной функций распределения и распределения плотности вероятности.

Анализатор, реализующий метод дискретных выборок

Рассмотренный выше метод измерений можно реализовать в дискретно-цифровом виде.

Оценка функции распределения. В этом случае напряжение реализации $u(t)$ случайного процесса $U(t)$ с помощью амплитудно-импульсного модулятора преобразуют в периодическую последовательность импульсов, огибающая амплитуд которых повторяет по форме исследуемую реализацию, — дискретные выборки. Полученные импульсы исследуемой реализации в дискриминаторе сравнивают в заданные дискретные моменты времени с фиксированным уровнем напряжения U_0 , соответствующим одному из уровней анализа u . Моменты сравнения напряжений задаются генератором импульсов выборок (их называют импульсами опроса), следующих с периодом следования T_0 . На выход дискриминатора импульсы проходят в те моменты, при которых напряжение реализации $u(t) \geq U_0$.

Отношение числа случаев n , когда в течение времени измерения $T = T_{\text{оп}}$, входное напряжение реализации $u(t) \geq U_0$, к полному количеству выборок N

(N задают достаточно большим) служит оценкой функции $F(u)=P[U(t) \geq U_0]$. Оценку интегральной функции распределения вычисляют по формуле: $P_T\{U(t) < U_0\} = 1 - n/N$. Производя измерения, соответствующие различной величине уровня U_0 , можно построить кривые оценки интегральной функции распределения.

Оценка плотности вероятности. Для определения значений плотности распределения вероятности подсчитывают число выборок, при которых напряжение реализации $u(t)$ случайного процесса оказывается в интервале уровней ΔU , т.е. выполняется одно из условий: $u \leq U(t) < u + \Delta U$ или $u - \Delta U/2 \leq U(t) < u + \Delta U/2$.

Использование метода дискретного счета позволяет применять при построении анализатора схемы и элементы цифровой техники, и в конечном счете, уменьшить погрешность измерений.

Микропроцессорный (цифровой) измеритель. Существенно расширяются возможности измерителей характеристик распределения вероятностей, построенных на основе микропроцессоров. Структура построения микропроцессорного измерителя характеристик распределения вероятностей (рис. 13.7) во многом аналогична структуре цифровых вольтметров с микропроцессором. Принцип действия рассматриваемого измерителя заключается в следующем.

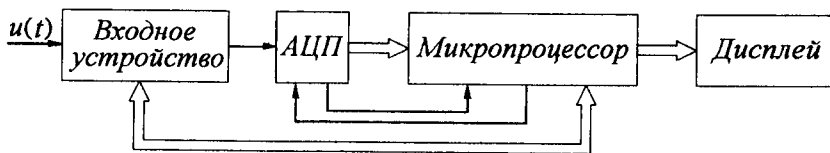


Рис. 13.7. Микропроцессорный измеритель характеристик распределения вероятностей

Напряжение реализации $u(t)$ стационарного эргодического случайного процесса $U(t)$ поступает через входное устройство на АЦП, преобразующий значение напряжения $u(t_i)$ в момент i -й выборки в числовой эквивалент m_i . Число уровней квантования 2^n , определяемое структурой АЦП, задает количество уровней анализа, а шаг квантования — ширину их дифференциального коридора. Полученное число m_i сравнивается с хранимыми в памяти микропроцессора цифровыми кодами q , соответствующими уровням анализа.

Выполнение условия $q_k \leq m_i < q_{k+1}$ означает, что напряжение реализации $u(iT_0)$ относится к k -му дифференциальному коридору, а в ячейке памяти, адрес которой соответствует номеру k , записывается единица. По истечении N выборок в n ячейках памяти накоплены числа, представляющие собой результаты анализа на интервале измерения. По этим данным микропроцессор вычисляет значения плотности распределения вероятностей. Результаты вычислений отображаются на дисплее в виде графика или в цифровой форме.

13.4. Измерение корреляционных функций

Корреляционная функция (функция корреляции). Математическое ожидание и дисперсия являются весьма важными, но не исчерпывающими характеристиками случайного процесса, так как определяются только одномерным законом распределения. Они не могут характеризовать взаимосвязь между различными сечениями случайного процесса при различных значениях времени t_1 и t_2 . Для этого используется *корреляционная функция* — неслучайная функция $R(t_1, t_2)$ двух аргументов t_1 и t_2 .

Корреляционная функция, называемая часто *автокорреляционной* (АКФ), описывает статистическую связь (корреляция — степень связи) между мгновенными значениями случайной функции, разделенными заданным значением времени $\Delta t = t_1 - t_2$. При равенстве аргументов, т.е. $t_1 = t_2$, корреляционная функция равна дисперсии случайного процесса. Корреляционная функция всегда неотрицательна.

Приборы, измеряющие значения функции корреляции, называются *коррелометрами*. Устройства, позволяющие получить при измерениях график всей функции корреляции (*коррелограмму*), получили название *коррелографов*.

Пусть копия сигнала $u(t + \tau)$, или, что равноценно $u(t - \tau)$, смещена относительно своего оригинала $u(t)$ на некоторый интервал времени τ . Для количественной оценки степени отличия (связи) исходного сигнала $u(t)$ и его смещенной во времени копии $u(t + \tau)$ используют автокорреляционную функцию.

Для детерминированного сигнала конечной длительности аналитическая запись АКФ представляет собой интеграл вида:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u(t - \tau)dt = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u(t + \tau)dt. \quad (13.19)$$

Важнейшее свойство АКФ — ее четность: $R(\tau) = R(-\tau)$, что нетрудно доказать математически.

В теоретических расчетах часто используют нормированную АКФ:

$$K(\tau) = R(\tau)/R(0) = R(\tau)/\sigma^2, \quad (13.20)$$

где $R(0) = \sigma^2$.

Для периодического сигнала с периодом следования T , энергия которого бесконечно велика (так как сигнал существует бесконечное время), вычисление АКФ по формуле (13.19) неприемлемо. Тогда принято определять АКФ за период

$$R_{\pi}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t)u(t + \tau)dt. \quad (13.21)$$

Чтобы упростить объяснение, определим АКФ прямоугольного импульса единичной амплитуды, имеющего выбранную для удобства построения длительность $\tau_n = 5\tau$ (рис. 13.8, а).

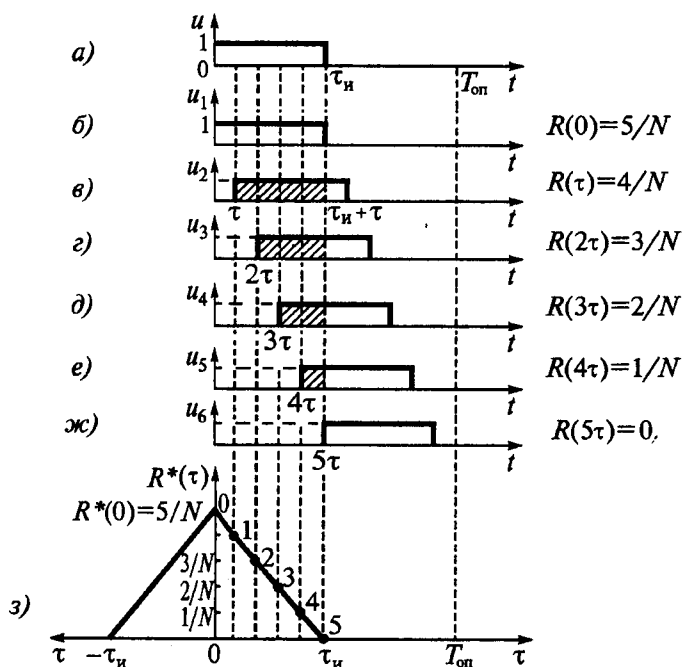


Рис. 13.8. К графическому определению автокорреляционной функции:
а — импульс; б — копия; в, г, д, е, ж — сдвинутые копии; з — оценка АКФ

Вычисление интеграла (13.19) удобнее провести графоаналитическим методом для некоторого произвольного интервала анализа (измерения) $T_{\text{оп}}$. Если копию исследуемого сигнала сдвигать дискретно на $n\tau$ ($n = 0, 1, \dots, 5$) и выбрать $T_{\text{оп}} = N\tau$, то оценка функции корреляции для каждого дискрета τ составляет значение $R^*(\tau) = n/N$. При построениях на рис. 13.8, а, ..., ж приведены соответственно: импульс $u(t)$; его точная копия $u_1(t)$; сдвинутые на $\tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$ и 5τ копии.

График определяемой автокорреляционной функции показан на рис. 13.8, з в виде линии, проведенной через точки 0, 1, ..., 5. В силу четности АКФ ее график симметричен относительно оси ординат.

Нетрудно заметить, что произведение $u(t)u(t + n\tau)$ не равно нулю только на интервалах времени, когда имеется наложение графиков сигнала и его сдвинутой копии.

Как следует из графиков рис. 13.8, этот интервал равен $\pi\tau - \tau_n$, если временной сдвиг меньше длительности импульса. Тогда для прямоугольного импульса оценка АКФ запишется так: $R^*(\tau) = (\tau_n - |\pi\tau|)$ при временном сдвиге $|\pi\tau| \leq \tau_n$. Итак, найденная АКФ имеет вид равнобедренного треугольника с шириной основания, в два раза больше длительности импульса и высотой, определяемой энергией исследуемого сигнала $R^*(0) = \mathcal{E} = \sigma_x^2$ (рис. 13.8, з).

В радиоизмерениях вводят удобный для анализа степени связи сигнала и копии, или разных сигналов, числовой параметр — *интервал корреляции*, равный ширине основания АКФ. В данном примере этот интервал: $\tau_k = 2\tau_n$.

В общем случае для некоторого интервала наблюдения $T_{\text{оп}}$ корреляционная функция случайного стационарного эргодического процесса имеет вид:

$$R(\tau) = \lim_{T_{\text{оп}} \rightarrow \infty} \frac{1}{T_{\text{оп}}} \int_0^{T_{\text{оп}}} x(t)x(t+\tau)dt. \quad (13.22)$$

При исследовании связи между двумя случайными реализациями $x_1(t)$ и $x_2(t)$ используют *взаимокорреляционную функцию*, которая в случае их эргодичности имеет вид:

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T_{\text{оп}} \rightarrow \infty} \frac{1}{T_{\text{оп}}} \int_0^{T_{\text{оп}}} x_1(t)x_2(t+\tau)dt. \quad (13.23)$$

В метрологии и радиоизмерениях целью корреляционного анализа является численная оценка функции корреляции для различных временных задержек τ . Эти оценки можно находить последовательно во времени или одновременно (параллельно; многоканальные коррелометры). Соответственно различают коррелометры последовательного и параллельного анализа. При последовательном анализе значение задержки τ , вводимой для одного из исследуемых процессов, последовательно изменяется. Последовательный анализ применяют при исследовании стационарных случайных процессов, статистические характеристики которых не зависят от начала отсчета времени. При параллельном анализе схема коррелометра представляет собой многоканальное устройство, в каналах которого измеряются значения функции корреляции, соответствующие различным фиксированным задержкам.

Аппаратурное выполнение коррелометров может быть как аналоговым, так и цифровым. Среди ряда подобных коррелометров различают два основных типа. Действие первых из них основано на *перемножении* исследуемых процессов в соответствии с определенным алгоритмом; вторых — на *представлении (аппроксимации)* искомой функции корреляции в виде конечной суммы членов разложения ее в ряд Фурье по простейшим ортонормированным функциям.

Коррелометры с перемножением сигналов

Структурная схема коррелометра, приведенная на рис. 13.9, содержит входные устройства 1 и 2, идеальный перемножитель, узел регулируемой задержки во времени одного из исследуемых процессов на величину τ , усредняющее и регистрирующее устройства.

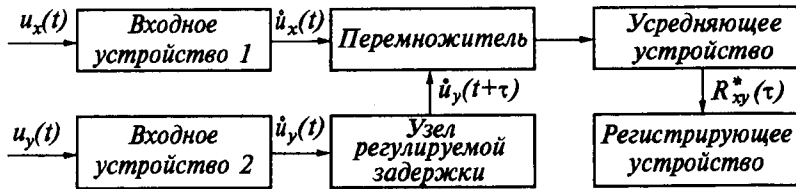


Рис. 13.9. Структурная схема коррелометра с перемножением

При измерениях каждому значению задержки τ соответствует постоянное напряжение, значение которого регистрируют. Кривую, построенную по этим точкам, принимают как оценку функции корреляции исследуемых процессов. При анализе функции автокорреляции на каналы 1 и 2 подают один и тот же исследуемый сигнал. При анализе функции взаимной корреляции в каналы устройства поступают различные сигналы.

Коррелометры с аппроксимацией сигналов

С метрологической точки зрения практический интерес для специалистов, кроме четности, представляют следующие свойства функции корреляции стационарного эргодического случайного процесса:

при очень больших значениях τ

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) = 0; \quad (13.24)$$

для ограниченных по длительности сигналов интеграл от модуля функции корреляции имеет конечное значение, т. е.

$$\int_0^{\infty} |R(\tau)| d\tau < B, \quad (13.25)$$

где B — конечное число.

Из курса математики известно, что если для любой пары функций $v_i(t)$ и $v_k(t)$ из их ортогональной системы выполняется условие

$$\int_{t_1}^{t_2} v_i(t) v_k(t) dt = \begin{cases} 1, & i = k; \\ 0, & i \neq k, \end{cases} \quad (13.26)$$

то система функций — ортонормирована (ортогональна и нормирована к 1).

При выполнении указанных условий функцию корреляции можно представить в виде обобщенного ряда Фурье по полной системе ортонормированных функций $v_i(\tau)$:

$$R(\tau) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i v_i(\tau), \quad (13.27)$$

где c_i — некоторые постоянные коэффициенты ряда.

При представлении функции корреляции в виде ряда (13.27) вся информация о ней содержится в значениях коэффициентов разложения c_i . Функция корреляции и ее значение для любой задержки τ будут известны, если определены коэффициенты c_i . Поэтому задача оценки функции корреляции в этом случае состоит в вычислении коэффициентов разложения по известной формуле:

$$c_k = \int_{t_1}^{t_2} u(t) v_k(t) dt. \quad (13.28)$$

При измерениях коэффициенты c_i можно определить по одной реализации случайного стационарного эргодического процесса с помощью специальных фильтров. Далее при анализе оценку функции корреляции формируют по найденным коэффициентам разложения с помощью устройств, работающих по алгоритму (13.27) при конечном числе слагаемых. Задерживать исследуемый сигнал во времени не требуется. Поэтому коррелометры с аппроксимацией сигнала не имеют устройств задержки.

Многоканальные цифровые коррелометры

Цифровые методы применяют и для построения коррелометров, в основу которых положены как идеальное перемножение с задержкой одного из сигналов, так и аппроксимация функции корреляции.

В коррелометрах с идеальным цифровым перемножением (рис. 13.10, а) вычислительные операции заменяются операциями суммирования и производятся согласно следующему алгоритму:

$$R^*(i\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \overset{\circ}{x}(k\tau) \overset{\circ}{x}(k\tau + i\tau), \quad (13.29)$$

где $i\tau$ — интервал сдвига ($i = 0, 1, \dots, n-1$); $\tau = m\Delta t$; Δt — интервал дискретизации; $\overset{\circ}{x}(i\tau)$ — квантованные по уровню значения центрированных реализаций $x(t)$ случайного процесса $X(t)$ в дискретные моменты времени $i\tau$; коэффициент $n = T_{\text{оп}}/\Delta t$ — количество дискретных значений анализируемого сигнала, полученных за интервал наблюдения $T_{\text{оп}}$. Целочисленный коэффициент m , отражающий соотношение между τ и Δt выбирается кратным, как показано на рис. 13.10, б.

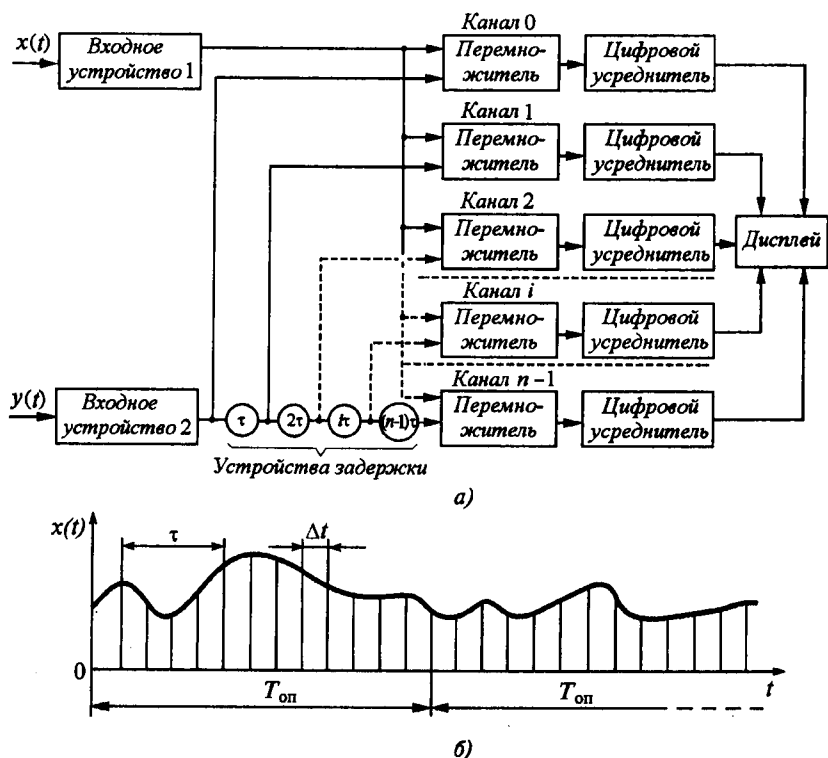


Рис. 13.10. Многоканальный цифровой коррелометр:
а — структурная схема; б — принцип дискретизации реализации

Рассмотрим назначение каждого из узлов многоканального цифрового коррелометра, показанного на рис. 13.10, а.

Входные устройства 1 и 2 осуществляют дискретизацию по времени и квантование по уровню напряжения исследуемых реализаций $x(t)$ и $y(t)$, а также представление дискретных отсчетов в числовом коде. В результате дискретизации по времени непрерывные функции, соответствующие исследуемым реализациям $x(t)$ и $y(t)$, трансформируются в решетчатые (последовательность дискретных значений — отсчетов) функции $x(i\Delta t)$, $y(i\Delta t)$. Значения отсчетов функций соответствуют значениям исследуемых процессов в моменты времени $i\Delta t$, где $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ — последовательность отсчетов.

Величину интервала дискретного считывания Δt выбирают на основании теоремы Котельникова. Количество интервалов квантования зависит от требуемой точности измерений, от распределения значений исследуемого процесса. Основным узлом входного устройства является АЦП, преобразующий значения напряжений исследуемых процессов в цифровой код. Входные уст-

ройства могут выполнять ряд дополнительных операций: в частности, усиление или ослабление входных сигналов.

Перемножители осуществляют перемножение кодов дискретных отсчетов входных сигналов. Цифровые усреднители выполняют цифровые операции суммирования произведений, деление результата суммирования на число произведений n . В ряде случаев производится нормирование ординат корреляционной функции. Дисплей производит вывод полученных в процессе измерений данных и регистрацию значений корреляционной функции в графическом или цифровом виде.

В коррелометр также входят устройства задержки, осуществляющие в канале задержку одной из реализаций на интервал $\tau, 2\tau, \dots, i\tau, \dots, (n-1)\tau$.

По структуре и принципу действия цифровой коррелометр представляет собой специализированное вычислительное устройство для выполнения операций определенного вида. Поэтому многие устройства и узлы цифровых коррелометров аналогичны устройствам микропроцессоров и компьютеров. Если на входе компьютера поставить преобразователь сигналов, то коррелометр легко выполнить перепрограммируемым на основе материнского микропроцессора.

Цифровые коррелометры позволяют получить высокие точность и быстродействие. Относительная погрешность при правильно выбранном времени $T_{\text{оп}}$ составляет менее 10 %.

Для упрощения схемного решения прибора широкое применение получают так называемые *знаковые коррелометры*, в которых реализуется следующий вид корреляционной функции:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T f_1[x(t)] f_2[y(t+\tau)] dt. \quad (13.30)$$

Здесь $f_1[x(t)]$ и $f_2[y(t)]$ — знаковые функции, определяемые по формуле:

$$f_1[x(t)] = \text{sgn}[x(t)] = \begin{cases} 1, & x(t) > 0; \\ 0, & x(t) = 0; \\ -1, & x(t) < 0. \end{cases} \quad (13.31)$$

Знаковая функция $f_2[y(t)]$ находится также как и функция $f_1[x(t)]$. Знаковые коррелометры широко используют при исследовании и измерении характеристик случайных процессов с нормальным законом распределения.

13.5. Спектральный анализ случайных процессов

Оценку спектральной плотности мощности (спектра мощности) случайного процесса проводят двумя методами: по выборочной оценке функции корреляции и путем фильтрации исследуемого процесса.

Выборочная оценка функции корреляции

Данный метод оценки спектральной плотности мощности случайного процесса основан на использовании преобразований Фурье. Из статистической радиотехники известно, что спектральная плотность и функция корреляции случайного процесса связаны *теоремой Хинчина–Винера*, выражаемой в виде прямого и обратного преобразований Фурье:

$$W_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (13.32)$$

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (13.33)$$

где $W_x(\omega)$ — спектральная плотность мощности; $R_x(\tau)$ — корреляционная функция мощности случайного процесса. Вычислив функцию корреляции, по формуле (13.32) находят спектральную плотность.

Данный способ оценки спектральной плотности мощности широко распространен в связи с применением алгоритмов быстрого преобразования Фурье, резко облегчающего вычислительные операции. Пользуясь БПФ, можно определить спектральную плотность на основании исследуемой реализации стационарного эргодического случайного процесса. Итак, все основные теоретические положения и способы спектрального анализа детерминированных сигналов, использующие преобразования Фурье и рассмотренные в гл. 11, применимы и при анализе случайных процессов.

Метод фильтрации

Метод фильтрации основан на пропускании реализации случайного процесса $u_x(t)$ через измерительное устройство, состоящее из каскадного соединения узкополосного фильтра с полосой пропускания Δf и настроенного на определенную частоту f , квадратичного элемента (квадратора), интегратора и дисплея (рис. 13.11).

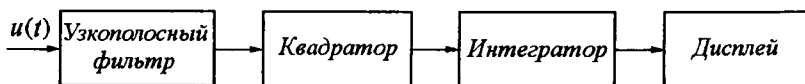


Рис. 13.11. Структурная схема измерителя спектра мощности

Напряжение на выходе устройства можно приближенно оценить по формуле (вывод для упрощения опущен):

$$W_u(f) \approx u^2(t)/\Delta f. \quad (13.34)$$

Для уменьшения погрешностей измерений необходимо произвести сглаживание оценки спектральной плотности мощности случайного процесса,

которое заключается в следующем. Находят выборочную спектральную плотность для k реализаций случайного процесса. Сглаженную оценку спектральной плотности для каждой частоты вычисляют как среднее арифметическое значение выборочных оценок $W_{T_{опi}}(f)$, соответствующих отдельным реализациям за период накопления (опроса) $T_{оп}$, т.е.

$$W_{T_{оп}}(f) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k W_{T_{опi}}(f). \quad (13.35)$$

Если случайный процесс является стационарным и эргодическим, то требуемые наборы реализаций можно получить из одной реализации путем разбиения ее по времени на части нужного интервала. Длина реализации определяется на основании требуемого наибольшего разрешения по частоте.

При измерении спектральной плотности мощности методом фильтрации сглаживание оценки имеет место, когда постоянная времени узкополосного фильтра существенно меньше времени накопления в интеграторе. Анализ показывает, что сглаженная оценка спектральной плотности является смещенной. Величина смещения определяется длительностью реализации и тем больше, чем короче реализация или шире рабочая полоса частот фильтра.

Дисперсия оценки зависит от количества реализаций, по которым производят усреднение. Чем больше число реализаций и больше k в формуле (13.35), тем меньше дисперсия сглаженной оценки спектральной плотности.

Контрольные вопросы

1. Какие сигналы (процессы) относятся к случайным?
2. Какой случайный процесс считается стационарным и эргодическим?
3. Что называется выборкой случайных величин?
4. Какими параметрами можно характеризовать случайный стационарный эргодический процесс? Привести основные формулы.
5. Как аналоговыми измерителями можно определить математическое ожидание?
6. Привести временные диаграммы, поясняющие метод дискретного определения математического ожидания цифровым прибором.
7. Объяснить работу цифрового измерителя дисперсии по структурной схеме.
8. Привести временные диаграммы, поясняющие алгоритм определения интегральной функции вероятности?
9. С помощью соответствующих временных диаграмм пояснить методику определения плотности вероятности.
10. Какой физический смысл вкладывается в понятие корреляционной функции?
11. Привести различные формы записи автокорреляционной и взаимокорреляционной функций.
12. Как выглядит упрощенная структурная схема коррелометра с перемножением?
13. Пояснить принцип реализации цифрового метода определения корреляционных функций по временным диаграммам.
14. Как определяют спектральную плотность мощности случайного процесса?

Глава 14. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ

Развитие научных исследований, разработка новых устройств и систем с использованием современных радиотехнологий, усложнение их производства, а также повышение требований к точности измерений и их быстродействию привели к необходимости измерять и контролировать одновременно от сотен до нескольких тысяч различных физических величин. Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке таких больших объемов измерительной информации стала главной причиной появления автоматизированных средств измерений и контроля.

Автоматизация процесса измерений дает значительный выигрыш во времени и в большинстве случаев значительно повышает точность измерений.

14.1. Общие сведения

Современные средства радиоизмерений в основном являются цифровыми и поэтому достигли достаточно высокого уровня развития и имеют наивысшие точности. Именно переход к построению цифровых средств измерений привел к созданию автоматизированных средств измерения.

По уровню автоматизации все средства измерений делятся на три основные группы:

- *неавтоматические*, позволяющие непосредственно оператору провести измерения;
- *автоматизированные*, способные провести в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции;
- *автоматические*, производящие в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей, хранением данных и выработкой управляющих сигналов.

В настоящее время все большее распространение получают автоматизированные и автоматические средства измерений. Это связано с широким использованием в средствах измерений электронной, микропроцессорной и компьютерной техники. Все эти средства часто называют обобщенным термином *«автоматизированные средства измерений»*.

К автоматизированным средствам измерений относят автономные многофункциональные цифровые приборы на основе микропроцессоров и измерительные системы.

14.2. Автономные многофункциональные цифровые приборы

Автономные многофункциональные цифровые приборы содержат микропроцессор, работают по жесткой программе и предназначены для измерений заданных физических величин, а также параметров сигналов или цепей. Это цифровые приборы, в которых часть операций осуществляется автоматически.

В автономных микропроцессорных приборах отдельной магистрали нет и все элементы подключают к магистрали микропроцессора. В них может быть не предусмотрено программирование или перепрограммирование микропроцессора в процессе работы. Необходимые программы обработки хранятся в ПЗУ, по мере надобности оператор вызывает их с помощью клавиатуры.

Микропроцессор может выполнять сервисные и вычислительные функции, а также самодиагностику прибора в целом. К сервисным функциям относят выбор диапазона измерений, переключение диапазонов, определение полярности входного напряжения, коммутацию входных цепей. В частности, в осциллографах автоматически устанавливается длительность развертки, осуществляется ее синхронизация, выбор масштаба по оси ординат. К сервисным функциям можно отнести и некоторые операции по коррекции погрешностей: калибровку прибора, коррекцию смещения нулевого уровня (так называемого «дрейфа нуля») в УПТ.

Вычислительные функции микропроцессора заключаются в статистической обработке результатов измерений: определении среднего значения и СКО. Возможно получение математических функций измеряемой величины: ее умножение и деление на константу, вычитание констант, что удобно при введении поправок, представлении измеряемой величины в логарифмическом масштабе. Часть сервисных функций можно реализовать и без микропроцессора на жесткой логике, однако вычислительные функции могут быть выполнены только с помощью микропроцессоров.

Автономные микропроцессорные приборы позволяют решать программным методом часть задач, решаемых в обычных приборах аппаратными средствами. В частности, для измерений амплитудного, средневывпрямленного и среднего квадратического значений напряжения аппаратными методами необходимы соответствующие преобразователи. Микропроцессорным прибором ту же задачу можно решить, преобразовав аналоговый измеряемый сигнал в цифровой с помощью АЦП, и затем по соответствующим программам вычислить требуемые параметры сигнала. Возможности прибора можно расширить, нарастив программное обеспечение, например, введя программы для спектрального анализа и статистической обработки. При этом аппаратная часть, содержащая АЦП, не усложняется, а меняется только программное обеспечение. Поэтому в ряде случаев микропроцессорные приборы можно делать многофункциональными, что позволит сократить парк средств измерений, необходимых для научных и производственных целей.

14.3. Измерительные системы

Измерительные системы (ИС) — это совокупность функционально объединенных средств измерений, компьютерной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления.

Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для измерения большого количества параметров и контроля технологического процесса производства какого-либо изделия, например изделий микроэлектроники.

Назначение любой измерительной системы, необходимые функциональные возможности, технические параметры и характеристики в решающей степени определяются *объектом исследования*, для которого данная система создается. Структура современных ИС довольно разнообразна и быстро развивается, существенно зависит от решаемых задач и их деление в настоящее время не имеет достаточно полного и четкого толкования. Приведем одну из возможных на данный момент упрощенных классификаций, относящуюся к специфике радиоизмерений (рис. 14.1). Основные элементы классификации поясняют непосредственно рисунком, ряд других приведен ниже.

В зависимости от выполняемых функций измерительные системы можно разделить на три основных вида: измерительные системы измерения и хранения информации (условно назовем их *прямыми измерительными системами*), контрольно-измерительные (автоматического контроля) и телеизмерительные системы. К ИС относятся также системы распознавания образов и системы технической диагностики, которые в радиоизмерениях не изучаются.

По числу измерительных каналов измерительные системы подразделяются на одно-, двух-, трех- и многоканальные (многомерные). Для совместных и совокупных измерений часто используют многоканальные, аппроксимирующие системы.

Наиболее бурно в настоящее время разрабатываются и внедряются прямые измерительные системы. Иногда эти системы называют *гибкими измерительными системами* (ГИС).

Основная особенность прямых измерительных систем — возможность программным способом перестраивать систему для измерений различных физических величин и менять режим измерений. Никаких изменений в аппаратной части при этом не требуется.

Прямые измерительные системы можно условно классифицировать на: информационно-измерительные (ИИС); измерительно-вычислительные комплексы (ИВК); компьютерно-измерительные (КИС).

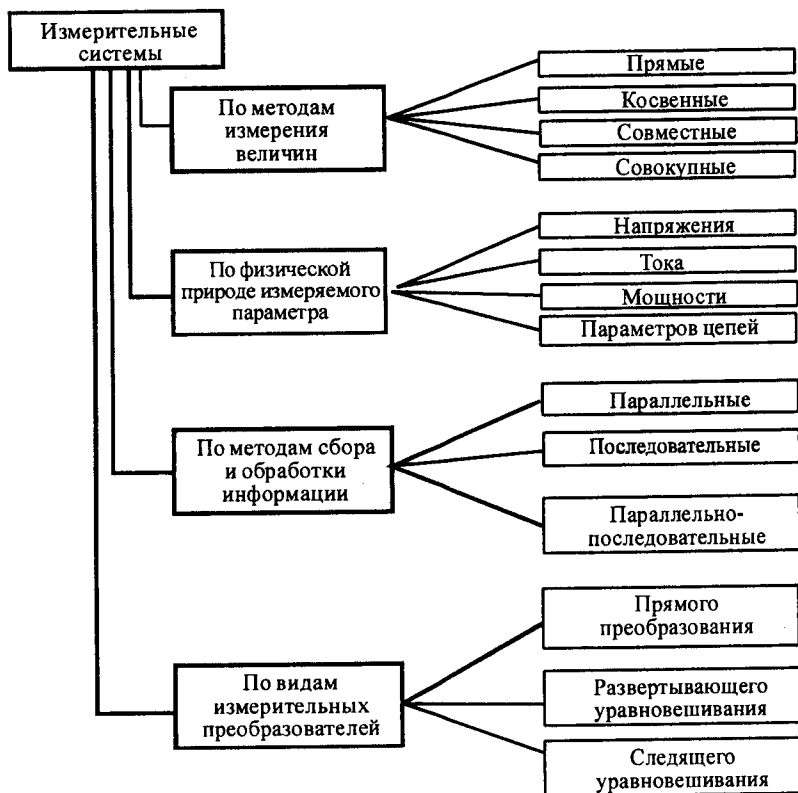


Рис. 14.1. Упрощенная классификация измерительных систем

Информационно-измерительные системы

Самым широким классом прямых измерительных систем являются *информационно-измерительные системы* (иногда их обозначают термином *измерительные информационные системы*; аббревиатура одинакова — ИИС).

Назначение ИИС определяют как целенаправленное оптимальное ведение *измерительного процесса* и обеспечение смежных систем высшего уровня достоверной информацией. Основные функции ИИС — получение измерительной информации от объекта исследования, ее обработка, передача, представление информации оператору или/и компьютеру, запоминание, отображение и формирование управляющих воздействий.

Информационно-измерительная система должна управлять измерительным процессом или экспериментом в соответствии с принятым критерием функционирования; выполнять возложенные на нее функции в соответствии с назначением и целью; обладать требуемыми показателями и характеристиками.

ками точности, помехоустойчивости, быстродействия, надежности, пропускной способности, адаптивности, сложности и прочее; отвечать экономическим требованиям, предъявляемым к способам и форме представления информации, размещения технических средств; быть приспособленной к функционированию с измерительными информационными системами смежных уровней иерархии и другими ИИС, т.е. обладать свойствами технической, информационной и метрологической совместимости, а также допускать возможность дальнейшей модернизации и развития.

Процессом функционирования информационно-измерительной системы, как и любой другой технической системы, является целенаправленное преобразование входной информации в выходную. Это преобразование выполняется либо автоматически с помощью аппаратуры технического обеспечения, либо совместно — оперативным персоналом и аппаратурой технического обеспечения в сложных ИИС, ИВК и КИС.

Применение современных средств схемотехники (микросхем, микропроцессоров и т.д.) коренным образом меняет принципы построения ИИС. Кроме того, методы достаточно обоснованного определения информационных потоков дают возможность уменьшить их избыточность. Это позволяет ставить задачу о возможно максимальном переносе обработки измерительной информации к месту ее формирования, т.е. перейти к конвейерной обработке измерительной информации в распределенной ИИС. В целом такая система состоит из следующих основных частей: системы первичных преобразователей (датчиков), устройств сбора и первичной обработки информации, средств вторичной обработки информации, устройств управления и контроля, устройств связи с другими системами объекта, накопителей информации.

По организации алгоритма функционирования различают следующие виды информационно-измерительных систем:

- с заранее заданным алгоритмом работы, правила функционирования которых не меняются, поэтому их можно использовать только для исследования объектов, работающих в постоянном режиме;
- программируемые, меняющие алгоритм работы по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;
- адаптивные, чей алгоритм работы, а часто и структура, изменяются, приспособляясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта;
- интеллектуальные, обладающие способностью к перенастройке в соответствии с изменяющимися условиями функционирования и способные выполнять все функции измерения и контроля в реальном масштабе времени.

Математическое, программное и информационное обеспечение входит в состав только ИИС с цифровыми вычислительными комплексами.

Математическое обеспечение — это аналитические (математические) модели объекта исследования (измерения) и вычислительные алгоритмы.

Математическая модель объекта измерения включает в себя описание взаимодействия между переменными входа и выхода для установившегося и переходного состояний, т.е. модели статики и динамики, а также граничные условия и допустимое изменение переменных процесса. Форма записи математической модели может быть различна: алгебраические и трансцендентные уравнения, дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных. Могут использоваться переходные и передаточные функции, частотные и спектральные характеристики и пр. Различают три основных метода получения математических моделей исследования ИИС:

- аналитический;
- экспериментальный;
- экспериментально-аналитический.

В последние годы при создании большинства ИС часто используют математическое моделирование, реализующее цепочку: объект — модель — вычислительный алгоритм — программа для компьютера — расчет на компьютере — анализ результатов расчета — управление объектом исследования.

Алгоритм измерения может быть представлен *программно, словесно, аналитически, графически* или сочетанием этих методов. Последовательность действий при этом не произвольна, а реализует тот или иной метод решения задачи. Во всех случаях она должна быть настолько точно сформулирована, чтобы не осталось места для различных двусмысленностей.

Программное обеспечение ИИС включает системное и общее прикладное программное обеспечение, в совокупности образующее математическое обеспечение, реализуется программной подсистемой. Системное программное обеспечение — это совокупность программного обеспечения компьютера, используемого в ИИС, и дополнительных программных средств, позволяющих работать в диалоговом режиме; управлять измерительными компонентами; обмениваться информацией внутри подсистем комплекса; автоматически проводить диагностику технического состояния.

По существу, программное обеспечение ИИС представляет собой взаимодополняющую, взаимодействующую совокупность подпрограмм, реализующих:

- типовые алгоритмы эффективного представления и обработки измерительной информации, планирования эксперимента и других измерительных процедур;
- метрологические функции комплекса (аттестацию, поверку, экспериментальное определение метрологических характеристик и т.п.);
- архивирование данных измерений.

Информационное обеспечение определяет способы и конкретные формы информационного отображения состояния объекта исследования в виде документов, диаграмм, графиков, сигналов для их представления обслуживающему персоналу и компьютеру для дальнейшего использования в управлении.

Всю такую измерительную систему в целом охватывает метрологическое обеспечение (рис. 14.2).

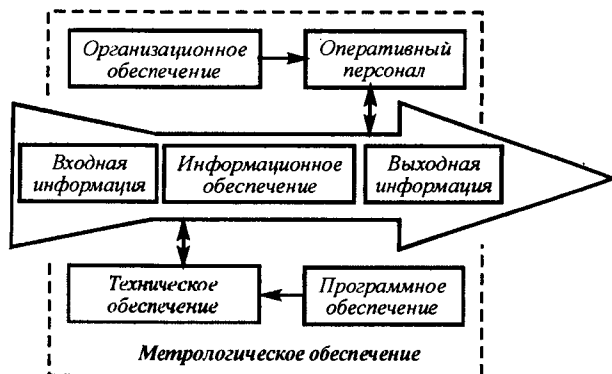


Рис. 14.2. Структура обеспечения ИИС

Структура технической подсистемы ИИС состоит из следующих элементов:

- блока первичных измерительных преобразователей (датчиков);
- средств вычислений электрических величин (измерительные компоненты);
- совокупности цифровых устройств и компьютерной техники (вычислительных компонентов);
- мер текущего времени и интервалов времени;
- устройств ввода-вывода аналоговых и цифровых сигналов с нормированными метрологическими характеристиками.
- блока вторичных измерительных преобразователей;
- совокупности элементов сравнения, мер и элементов описания — норм;
- блока преобразователей сигнала, цифровых табло, дисплеев, элементов памяти и др.;
- различных накопителей информации.

Кроме описанных, в систему может входить ряд устройств согласования со штатными системами объекта, с телеметрией и пр.

Важное значение имеет эргономическое, эффективное и наглядное построение форм дисплея и управляющих элементов, называемых *интерфейсом пользователя*, обеспечивающих взаимодействие оператора с компьютером. Эффективность интерфейса заключается в быстром, насколько это возможно, развитии у пользователя простой концептуальной модели взаимодействия с ИИС. Другими важными характеристиками интерфейса пользователя являются его наглядность и конкретность, что обеспечивается с помощью последовательно раскрываемых окон, раскрывающихся вложенных меню и командных строк с указанием функциональных «горячих» клавиш.

В истории развития информационно-измерительных систем можно отметить ряд поколений.

Первое поколение характерно формированием концепции ИИС и системной организацией совместной работы средств получения, обработки и передачи количественной информации. Это были в основном системы централизованного циклического получения измерительной информации с элементами вычислительной техники на базе дискретных полупроводниковых элементов. Данный период (конец 50-х — начало 60-х годов прошлого столетия) называют периодом *детерминизма*, так как для анализа в ИИС использовался хорошо разработанный аппарат аналитической математики.

Второе поколение связано с использованием адресного сбора информации и ее обработки с помощью встроенных ЭВМ. Элементную базу таких систем представляют микроэлектронные схемы малой и средней степени интеграции. Этот период (70-е годы) характерен решением целого ряда вопросов теории систем в рамках теории случайных процессов и математической статистики, поэтому его принято называть периодом *стохастичности*.

Третье поколение отражается широким введением в информационно-измерительные системы БИС, микропроцессоров, микроЭВМ и промышленных функциональных блоков, совместимых между собой по информационным, метрологическим, конструктивным, энергетическим и эксплуатационным характеристикам, а также созданием распределенных и адаптивных ИИС.

Четвертое поколение отличается появлением гибких перестраиваемых программируемых ИИС, что связано с развитием вычислительной техники. В элементной базе резко возрастает доля микросхем большой и сверхбольшой степени интеграции.

Пятое поколение бурно развивается и это дань появлению адаптивных, интеллектуальных и виртуальных измерительных информационных систем, построенных на базе персональных компьютеров и современного математического и программного обеспечения.

Измерительно-вычислительные комплексы

Одной из разновидностей ИИС являются *измерительно-вычислительные комплексы (ИВК)* — функционально объединенная с помощью специальной многоканальной магистрали система (совокупность) средств измерений, вычислительной техники, устройств отображения информации и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения конкретной измерительной задачи. Основными признаками принадлежности измерительной системы к ИВК являются: наличие компьютера; программного управления средствами измерений; нормированных метрологических характеристик; блочно-модульной структуры, состоящей из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

По назначению ИВК делят на типовые, проблемные и специализированные.

Типовые комплексы предназначены для решения широкого круга типовых задач автоматизации измерений, испытаний или исследований независимо от области применения.

Проблемные комплексы разрабатывают для решения специфичной задачи в конкретной области автоматизации измерений.

Специализированные комплексы используются для решения уникальных задач автоматизации измерений, для которых разработка типовых и специализированных комплексов экономически нецелесообразна.

ИВК предназначены для:

- осуществления прямых, косвенных, совместных или совокупных измерений физических величин;

- управления процессом измерений и воздействия на объект измерений;

- представления оператору результатов измерений в требуемом виде.

Чтобы реализовать эти функции, ИВК должен:

- эффективно воспринимать, преобразовывать и обрабатывать электрические сигналы от первичных измерительных преобразователей;

- управлять средствами измерений и другими техническими устройствами, входящими в его состав;

- вырабатывать нормированные сигналы, являющиеся входными для средств воздействия на объект;

- оценивать метрологические характеристики и представлять результаты измерений в установленной форме.

14.4. Компьютерно-измерительные системы

Как уже отмечалось, в настоящее время сформировалось новое направление в метрологии и радиоизмерительной технике — *компьютерно-измерительные системы* (КИС), и их разновидность, или направление развития — *виртуальные* (виртуальный — кажущийся) *измерительные приборы* (проще, *виртуальные приборы*). Компьютерно-измерительная система обязательно включает в себя компьютер, работающий в режиме реального масштаба времени или, как теперь принято говорить, в режиме *on-line*.

В последние годы персональные компьютеры используются не только как вычислительные средства, но и как универсальные измерительные приборы. Компьютерно-измерительные системы на основе персонального компьютера заменяют стандартные измерительные приборы (вольтметры, осциллографы, анализаторы спектра, генераторы и пр.) системой виртуальных приборов. Причем ряд этих приборов может быть активизирован (воспроизведен) на одном персональном компьютере одновременно.

К отличительным особенностям и основным преимуществам компьютерно-измерительных систем по сравнению с микропроцессорными приборами относятся:

- обширный фонд стандартных прикладных компьютерных программ, доступных для оператора, позволяющий решать широкий круг прикладных задач измерений (исследование и обработка сигналов, сбор данных с датчиков, управление различными промышленными установками и т. д.);
- возможность оперативной передачи данных исследований и измерений по локальным и глобальным компьютерным сетям (например, сети Internet);
- высокоразвитый графический интерфейс пользователя, обеспечивающий быстрое освоение взаимодействия с системой;
- возможность использования внутренней и внешней памяти большой емкости;
- возможность составления компьютерных программ для решения конкретных измерительных задач;
- возможность оперативного использования различных устройств документирования результатов измерений.

Структурная схема КИС

В самом общем случае КИС может быть построена двумя способами: с последовательной или параллельной архитектурой.

В КИС с последовательной архитектурой (ее иногда называют *централизованной системой*) части системы, преобразующие анализируемые сигналы, обрабатывают их в последовательном режиме. Поэтому вся соответствующая электроника размещается на слотах компьютера. Достоинства такой архитектуры построения КИС очевидны: благодаря использованию принципа разделения обработки по времени стоимость системы невелика.

В КИС с параллельной архитектурой содержится ряд параллельных каналов измерения, каждый из которых имеет собственные узлы преобразования анализируемых сигналов и только процессор компьютера работает в режиме мультиплексирования (т.е. объединения сигналов). Подобный принцип построения КИС позволяет проводить оптимизацию обработки сигналов в каждом канале независимо. В такой системе преобразование сигналов можно выполнять локально в месте расположения источника исследуемого сигнала, что позволяет передавать сигналы от измеряемого объекта в цифровой форме.

На рис. 14.3 показана обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы, отражающая как последовательную, так и параллельную архитектуру построения.

Взаимодействие между отдельными элементами КИС осуществляется с помощью внутренней шины персонального компьютера, к которой подключены как его внешние устройства (дисплей, внешняя память, принтер, плоттер), так и измерительная схема, состоящая из коммутатора, АЦП и блока образцовых программно-управляемых мер напряжения и частоты.

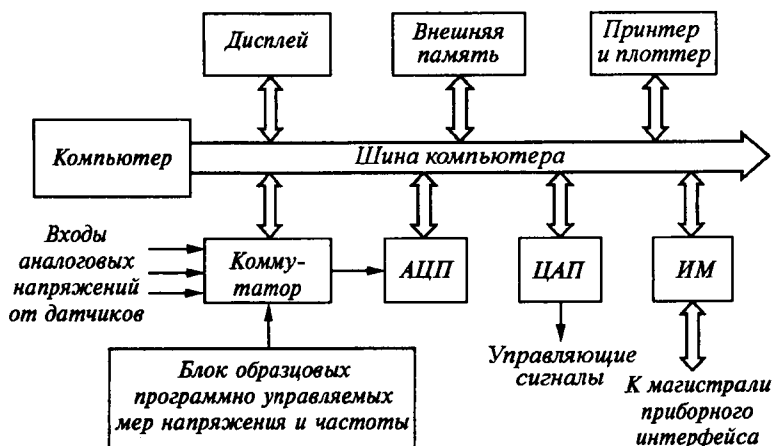


Рис. 14.3. Обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы

С помощью ЦАП можно вырабатывать управляющие аналоговые сигналы; интерфейсный модуль (ИМ) подключает измерительный прибор к магистрале приборного интерфейса. Коммутатор устройства обеспечивает подачу аналоговых напряжений с внешних датчиков на узлы системы.

Достаточно простые узлы КИС можно разместить на одной плате персонального компьютера. Существуют и более сложные структуры КИС, в которых в соответствии с решаемой измерительной задачей по установленной программе коммутируются необходимые измерительные элементы, т.е. меняется архитектура построения системы.

Одним из элементов КИС является блок образцовых программно управляемых мер напряжения и частоты. В качестве встроенных образцовых мер напряжения в КИС чаще всего применяются стабилитроны, температурный коэффициент напряжения которых составляет около $2,5 \cdot 10^{-5}$. Наиболее эффективным способом стабилизации опорного напряжения является термостатирование блока стабилитронов. Термостат поддерживает температуру элементов около 30°C со стабильностью не менее $0,1^\circ \text{C}$. Недостатком такой схемы являются достаточно длительный прогрев термостата (до 30 мин), а также большие скачки температуры при включении термостата. Температурные перепады ускоряют процесс старения стабилитронов, а следовательно, снижают их долговременную стабильность.

В настоящее время в КИС имеется возможность учитывать температурную нестабильность элементов программными методами. Для этого в блок стабилитронов вводят датчик температуры и экспериментально определяют зависимость опорного напряжения от температуры. Эту зависимость записывают в

ПЗУ компьютера или во внешнюю память. В процессе эксплуатации прибора температура стабилитронов автоматически измеряется и по этой зависимости вводится поправка в величину образцового напряжения. При работе без дополнительного подогрева значительно возрастает их долговременная стабильность. Аналогично измеряют и учитывают нестабильность частоты кварцевого генератора — меры частоты: сигналы с датчика температуры воздействуют на варикап, подстраивающий генератор на номинальную частоту. Нестабильность частоты кварцевого генератора может быть снижена до 10^{-7} . Кварцевый генератор можно использовать в качестве задающего, если в системе необходим синтезатор частоты с дискретной сеткой частот.

В последних разработках КИС предусмотрена возможность определения индивидуальных функций влияния температуры на различные параметры виртуального прибора: дрейф нуля УПТ, сопротивление переключателей, коэффициенты передачи различных структурных элементов. Непрерывный контроль температуры блоков позволяет автоматически корректировать возникающие погрешности измерения.

14.5. Виртуальные приборы

Наиболее перспективным направлением в развитии компьютерно-измерительных систем является разработка виртуальных приборов.

Виртуальный прибор состоит из современного быстродействующего персонального компьютера, наличие которого — необходимое условие высококачественных и точных измерений, и одной-двух *плат сбора данных* (ПСД). Плата устанавливается в компьютер (обычно в слот ISA или PCI) или во внешнее дополнительное устройство, подключаемое через LPT-порт в комплексе с соответствующим программным обеспечением.

Важную роль в создании виртуальных приборов играет разработка платы сбора данных с необходимыми метрологическими характеристиками для данной измерительной задачи, такими, как разрядность АЦП, быстродействие и динамические погрешности аналого-цифрового канала. При этом необходимо использование быстрых и эффективных алгоритмов обработки измеряемой информации, разработка удобной программы сбора и отображения данных под наиболее распространенные операционные системы Windows 98, 2000, NT, XP и других видов.

Пользователь виртуального прибора включает объект графической панели с помощью клавиатуры, «мыши» или специализированной прикладной программы. Виртуальные приборы сочетают большие вычислительные и графические возможности персонального компьютера с высокой точностью и быстродействием АЦП и ЦАП, применяемых в ПСД. По существу виртуальные приборы (как практически и все типы КИС) выполняют анализ амплитудных, частотных, временных характеристик различных радиоэлектронных цепей и

измеряют параметры сигналов с точностью примененных АЦП и ЦАП, а также формируют сигналы как для процесса собственно измерений, так и для автоматизации измерительных систем.

Программная часть виртуального прибора может эмулировать (создать) на экране дисплея компьютера виртуальную переднюю управляющую панель стационарного измерительного прибора. Сама панель с виртуальными кнопками, ручками и переключателями, сформированная на экране дисплея, становится панелью управления виртуального прибора. В отличие от реальной панели управления стационарного измерительного прибора, виртуальная панель может быть многократно перестроена в процессе работы для адаптации к конкретным условиям эксперимента. В зависимости от используемой платы и программного обеспечения пользователь получает измерительный прибор под ту или иную метрологическую задачу.

В качестве примера рассмотрим виртуальный цифровой запоминающий осциллограф ЛАн10М4. Внешний вид программного интерфейса (виртуальной графической измерительной панели) цифрового виртуального осциллографа представлена на рис. 14.4.

Виртуальный цифровой запоминающий осциллограф предназначен для наблюдения, регистрации, долговременного хранения, анализа и измерения

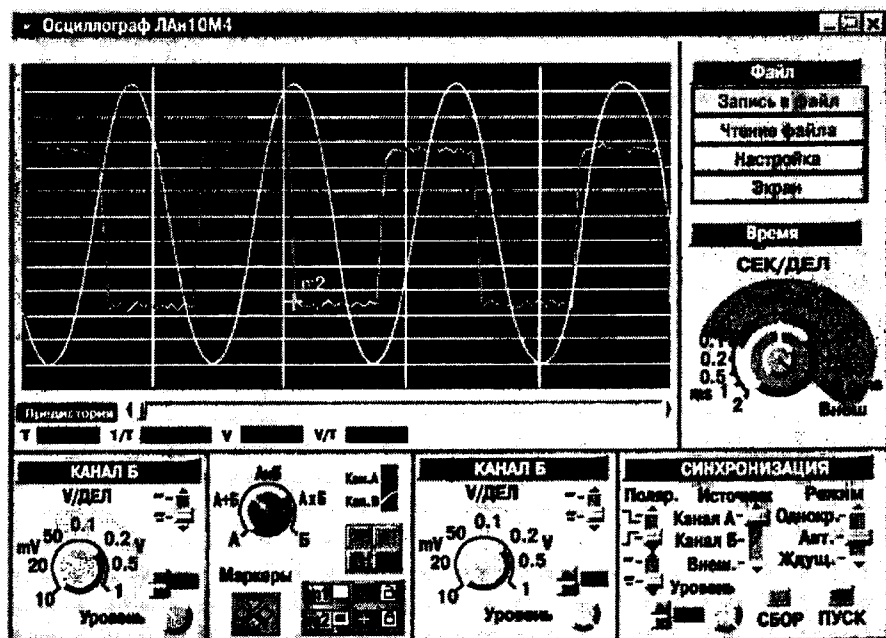


Рис. 14.4. Внешний вид программного интерфейса виртуального осциллографа

амплитудных и временных параметров различных видов импульсных, периодических и случайных процессов.

Программный пакет «осциллограф», заложенный в память компьютера или внешнюю память, обменивается данными с платой сбора данных по готовности прибора к обработке. После выдачи плате специальной команды на сбор данных программа ожидает от нее сообщения об окончании процедуры заполнения буферной памяти, встроенной в ПСД. Затем анализируемые сигналы поступают в осциллограф (компьютер), их обработка и исследование полностью передается процессору.

Программные файлы позволяют с помощью компьютера документировать исследуемые (измеряемые) процессы, сравнивать сигналы с эталонными и отображать сигналы, созданные пользователем в его программах.

На рис. 14.5 показан внешний вид программного интерфейса цифрового виртуального анализатора спектра, а на рис. 14.6 — внешний вид программного интерфейса цифрового генератора сигналов. Анализатор спектра имеет число гармоник 2...1024 и позволяет вычислить амплитуды и фазы гармоник, а также коэффициенты Фурье спектрального представления исследуемого сигнала.

Принцип действия платы сбора данных упрощенно описывается так.

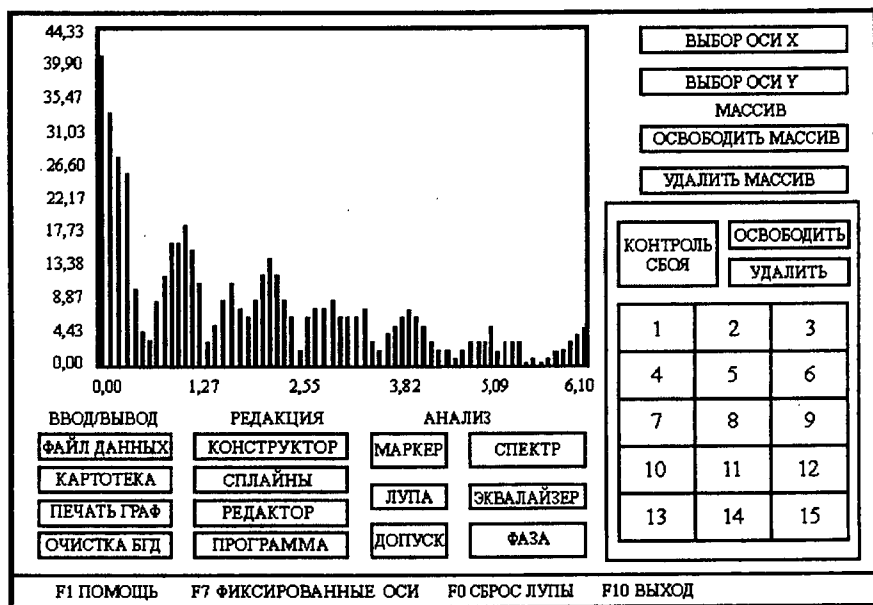


Рис. 14.5. Внешний вид программного интерфейса виртуального анализатора спектра

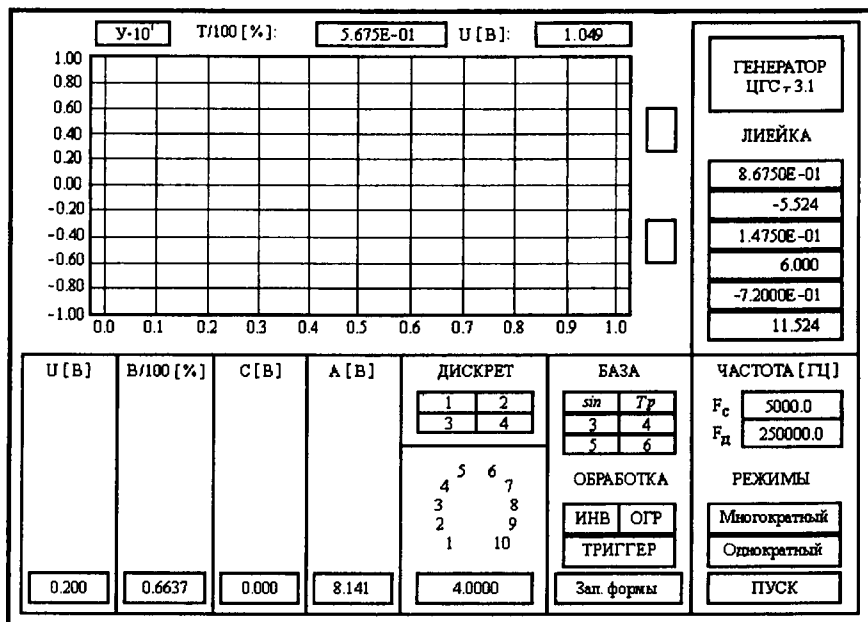


Рис. 14.6. Внешний вид программного интерфейса виртуального генератора сигналов

Процесс сбора данных можно условно разделить на два этапа: запись оцифрованных сигналов в буферную память ПСД (соответствует обратному ходу луча реального осциллографа) и передача данных в виртуальный осциллограф, их обработка и вывод на экран (соответствует прямому ходу луча реального осциллографа). Режим «прямого хода луча» (интервал обновления изображения на экране) зависит от объема памяти записывающего буфера ПСД, быстродействия процессора и ОЗУ компьютера и числа каналов осциллографа.

Несмотря на то что исследуемые сигналы являются аналоговыми, изображение на виртуальном экране (дисплее компьютера) осциллографа формируется после аналого-цифрового преобразования и поэтому является дискретным. Виртуальные кнопки, ручки, переключатели и другие элементы графического интерфейса практически не отличаются от реальных. Единственное и главное их отличие заключается в изменении положения ручек и переключателей, которое осуществляется с помощью «мыши» (или клавиатуры), а не рукой, как у реальных измерительных приборов.

Достоинства виртуальных цифровых запоминающих осциллографов:

- высокая точность измерений параметров сигналов или цепей;
- яркий, четко сфокусированный экран на любой скорости развертки и резко очерченные контуры изображения;

- широкая полоса пропускания;
- возможность запоминания эпюры сигнала на произвольное время;
- автоматическое измерение параметров сигналов;
- возможность статистической обработки результатов измерения;
- наличие принтера и плоттера для создания отчета о результатах измерений, а также упрощенная архивация результатов измерений;
- возможность сравнения текущих данных с образцовыми или предварительно записанными;
- наличие средств самокалибровки и самодиагностики;
- возможность исследования переходных процессов, протекающих в электрических цепях.

В данном осциллографе предусмотрена его синхронизация по комбинации сигналов от нескольких генераторов.

Итак, широкие вычислительные возможности виртуальных приборов позволяют реализовать программными методами многие способы повышения точности измерений, эффективности и быстродействия. Например, если полученная при измерениях гистограмма распределения физической величины, наблюдаемая экспериментатором на дисплее компьютера, имеет выпавшие результаты и сглаженную форму, то можно предположить существование выбросов и наличие дрейфа измеряемой величины или погрешности. Для устранения выбросов можно использовать одну из статистических программ.

Виртуальные приборы имеют большое преимущество перед микропроцессорными измерительными приборами, поскольку пользователь получает доступ к обширным объемам прикладных программ, может использовать внешнюю память большой емкости и различные устройства документирования результатов измерений. Сочетание платы сбора данных, измерительного устройства и персонального компьютера представляет оператору новые возможности, недостижимые автономными измерительными приборами. Теперь для проведения эксперимента и измерений необходимо только наличие компьютера, а все остальные программно-аппаратные средства подбираются исходя из технических требований самого проводимого эксперимента.

К преимуществам виртуальных приборов относится их экономическую эффективность — практически любая плата сбора данных и компьютерные программы обработки измерительной информации намного дешевле измерительного прибора. Многие метрологические, измерительные и исследовательские задачи в XXI в. будут решаться с помощью виртуальных приборов.

14.6. Интеллектуальные измерительные системы

Интеллектуальные измерительные системы — системы, которые могут индивидуально программироваться на выполнение специфических задач, используя программируемый терминал (программатор) для ввода парамет-

ров конфигурирования. Такие системы имеют средства представления информации: дисплей для визуализации мнемонических символов команд, цифровые индикаторы, дающие оператору необходимую информацию, и клавиши переключения видов работы. Блок бесперебойного питания обеспечивает сохранность программ при отключении питания на длительное время.

Подобные измерительные системы способны выполнять все функции измерения и контроля в реальном масштабе времени. Это позволяет осуществлять функции измерения и контроля «высокого уровня» без применения больших компьютеров. При автономном функционировании такая ИС обеспечивает непрерывные измерения и контроль заданных параметров, сбор данных и обработку сигналов.

Интеллектуальные измерительные системы имеют существенные преимущества перед традиционными, а именно:

- высокое быстродействие контуров управления процессами измерения, а также высокую скорость сбора данных;
- универсальность — стандартные интерфейсы обеспечивают простое подключение к любым системам и оборудованию;
- высокую надежность на каждом системном уровне — применение универсальных методов обеспечивают безотказную работу;
- взаимозаменяемость — так как интеллектуальные системы являются стандартными устройствами, индивидуально программируемыми в расчете на их специфические функции, то каждое из них может быть заменено другим устройством того же функционального назначения; каждая система может рассматриваться как резервная для любого типа систем того же класса, что снижает число дополнительных резервных средств измерения, контроля и регулирования и сводит к минимуму аварийный период в маловероятном случае выхода из строя какого-либо элемента.

Принципы построения и структуры интеллектуальных ИС интегрируют в себе все лучшие стороны традиционных систем, но более насыщены микропроцессорной и компьютерной техникой. Интеллектуальные измерительные системы позволяют создать алгоритмы измерений, которые учитывают рабочую, вспомогательную и промежуточную информацию о свойствах объекта измерений и условиях измерений. Обладая способностью к перенастройке и перепрограммированию в соответствии с изменяющимися условиями функционирования, интеллектуальные алгоритмы позволяют повысить быстродействие и метрологический уровень измерений.

14.7. Стандартные интерфейсы

Устройство сопряжения компьютера со средствами измерений или любыми другими внешними системами называют *интерфейсом*. Иногда в это понятие включают и программное обеспечение автоматизированной системы.

Обычно в ИС используются стандартные модули, подключенные к общей магистрали, и стандартные интерфейсы. При этом для решения новой метрологической задачи достаточно сменить часть модулей, используемых в качестве источника или приемника информации, и программное обеспечение.

В зависимости от задач ИС, номенклатуры используемых средств измерений и их характеристик можно построить интерфейсы различной сложности с различными структурами. Создание интерфейсов для каждой задачи или групп задач экономически невыгодно, поэтому разработаны стандартные интерфейсы. Рассмотрим интерфейсы МЭК 625.1 и КАМАК.

Эти интерфейсы являются магистральными и в них все устройства подключены к общей магистрали. По отношению к магистрали устройства могут быть источником информации или ее приемником. В каждый момент в системе может быть только один источник. Приемник служит для приема информации, их может быть несколько. Каждое устройство (источник или приемник) имеет свой адрес, по которому осуществляется его вызов для обмена информацией. Адресацию устройств и управление их работой выполняет контроллер.

Интерфейс МЭК 625.1

Интерфейс используется в небольших локальных ИС на основе серийно выпускаемых промышленностью средств измерений: цифровых вольтметров, частотомеров, программируемых генераторов, в состав которых введены интерфейсные модули, позволяющие использовать средства измерений как автономно, так и в составе ИС.

Если имеются необходимые приборы с интерфейсами и можно выбрать компьютер, то создание аппаратной части ИС заключается в соединении всех составных приборов с компьютером специальным кабелем со стандартным разъемом.

Интерфейс КАМАК

Этот интерфейс служит основой создания мощных наращиваемых ИС, предназначенных для управления экспериментальным оборудованием и обработки данных.

В системе КАМАК все устройства выполняются в виде модулей — вставных блоков, помещенных в стандартный каркас — крейт. Модули вставляют в ячейки крейта и стандартными разъемами соединяют с магистралью. В крейте предусмотрено 25 ячеек. Модули могут функционировать только в крейте, поскольку от источников питания по магистрали к ним поступают все необходимые сигналы и напряжения питания. Модули предназначены для приема информации, ее обработки, передачи, преобразования и хранения. Непосредственно измерения модули не выполняют, хотя в отдельных случаях, подобрав необходимые модули и обеспечив их взаимодействие, можно решать и измерительные задачи.

Для управления работой модулей в крейт встроен контроллер, который осуществляет связь с внешними устройствами: компьютером, внешней памятью, другими крейтами. Контроллер в основном выполняет функции управления и простейшей обработки информации, вычислительные же задачи решает компьютер.

Магистраль крейта состоит из 86 однопроводных линий. По специальным линиям магистралей к модулям подводят питающие напряжения. Передача и прием данных в крейте производятся в двоичном параллельном коде по 24 линиям чтения и по 24 линиям записи. В системе модули адресуются контроллером по индивидуальным адресным линиям. Обмен информацией выполняется в синхронном режиме. Эти особенности обеспечивают высокое быстродействие интерфейса.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяется автоматизация измерений?
2. Что относят к автоматизированным средствам измерений?
3. Что имеют в своем составе автономные multifunctional цифровые приборы?
4. Какие задачи решают автономные микропроцессорные приборы?
5. Что собой представляют измерительные системы?
6. Какова структура современных измерительных систем?
7. На какие классы можно условно поделить прямые измерительные системы?
8. Для чего применяют информационно-измерительные системы?
9. Как различают информационно-измерительные системы по организации алгоритма функционирования?
10. Какое обеспечение входит в состав ИИС?
11. Какие задачи решают измерительно-вычислительные комплексы?
12. На какие классы делятся ИВК по назначению?
13. Каково назначение компьютерно-измерительных систем?
14. На основе каких узлов и устройств построены компьютерно-измерительные системы?
15. Какие основные особенности и преимущества перед другими типами ИС имеют компьютерно-измерительные системы?
16. Как выглядит обобщенная структурная схема КИС?
17. Что представляют собой виртуальные приборы и какие элементы включаются в их структуру?
18. Что собой представляют интеллектуальные измерительные системы?
19. Для каких целей служат стандартные интерфейсы?

ЧАСТЬ III

ОСНОВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ И СЕРТИФИКАЦИИ

Глава 15. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА СТАНДАРТИЗАЦИИ

В настоящее время ускорение технического прогресса, повышение качества и надежности изделий радиоэлектроники, создание основы для широкого развития специализации производства и внедрения комплексной механизации и автоматизации производственных процессов неразрывно связаны со стандартизацией. Главные аспекты внедрения стандартизации в России: возрастающая сложность управления современным хозяйством; быстрое развитие науки и техники; усовершенствование систем, устройств и изделий, в разработке которых участвует большое число фирм; создание и освоение новых материалов; повышение требований к качеству, надежности и долговечности изделий; необходимость быстрой переналадки производства и т. д.

15.1. Общие сведения

В наши дни во всех передовых странах стандартизация становится всеобъемлющей, пронизывающей все звенья промышленности. Стандартизация основывается на объединенных достижениях науки, техники и передового опыта и определяет основу не только настоящего, но и будущего развития, и должна осуществляться неразрывно с техническим прогрессом.

В России первые государственные стандарты в радиотехнике и электронике были разработаны в конце 20-х — начале 30-х годов прошлого столетия и устанавливали нормы расхода материалов на сооружение, содержание и ремонт воздушных, телефонных и телеграфных линий связи; нормы сопротивления изоляции городских телефонных кабельных сетей; условные обозначения в городской телефонной магистральной и распределительной сетях. Были введены стандарты на кабели телефонные распределительные; на обозначение основных величин в области радиотехники и других областях.

Стремительное развитие радиотехники в последующие годы значительно расширило области и масштабы стандартизации. Был разработан стандарт на основные параметры системы телевизионного вещания; утверждены стан-

дарты на классификацию, параметры и методы испытаний генераторных и приемно-усилительных ламп, электронно-лучевых трубок, элементы электронной техники, антенн для радиовещания, приемников и передатчиков.

Для приведения показателей, устанавливаемых стандартами, в соответствие с современным научно-техническим уровнем пересмотрены устаревшие стандарты и внесены изменения в ряд действующих. Государственные стандарты Российской Федерации наряду с основными, качественными показателями стали регламентировать показатели надежности и долговечности изделий. Разработаны перспективные стандарты в области радиотехники, отражающие последние достижения науки, техники и мировой опыт промышленного производства.

В Российской Федерации действует *государственная система стандартизации* (ГСС), объединяющая и упорядочивающая действия по стандартизации на всех уровнях производства и управления на основе комплекса государственных стандартов. ГСС включает стандарты, содержащие совокупность взаимосвязанных положений и правил, определяющих основные понятия, цели и задачи стандартизации; организацию и методику планирования и проведения работ по стандартизации; порядок разработки, внедрения и обращения стандартов и других нормативно-технических документов по стандартизации; порядок внесения в них изменений; контроль за внедрением и соблюдением стандартов; объекты стандартизации; категории и виды стандартов; правила построения, изложения, оформления и содержания стандартов и пр.

Основными законами, обеспечивающими работоспособность в области стандартизации, являются следующие Федеральные законы Российской Федерации:

- «О стандартизации»;
- «Об обеспечении единства измерений»;
- «О защите прав потребителей»;
- «О сертификации продукции и услуг»;
- «О техническом регулировании» — введен в действие с 01.07.2003 г.

Введем основные понятия и определения, касающиеся стандартизации, установленные законом Российской Федерации «О стандартизации» и стандартом в этой области ГОСТ Р 1.0–92. Изложенные ниже понятия и термины в области стандартизации разработаны с учетом рекомендаций международных организаций по стандартизации и приняты многими странами.

Стандартизация — это деятельность по установлению норм, правил и характеристик (далее — требования) в целях обеспечения:

- безопасности продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- технической и информационной совместимости, а также взаимозаменяемости продукции;
- качества продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии;
- единства измерений;

- экономии всех видов ресурсов;
- безопасности хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций;
- обороноспособности и мобилизационной готовности страны.

В международной практике узаконено более простое определение стандартизации. Согласно ему, *стандартизация* — установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении условий эксплуатации (использования) и требований безопасности. Стандартизация направлена на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления положений для всеобщего и многократного применения в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Объект стандартизации — продукция, работа (процесс), услуга, подлежащие или подвергшиеся стандартизации (т. е. которые служат предметом работы по стандартизации и могут быть охарактеризованы количественно и качественно с помощью условных единиц, обозначений или понятий).

Нормативный документ — документ, устанавливающий правила, общие принципы, характеристики объектов стандартизации, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

Стандарт — нормативный документ по стандартизации, устанавливающий комплекс норм, правил, требований к объекту стандартизации и утвержденный (принятый) признанным органом (предприятием). Стандарт разрабатывается на основе достижений науки, техники, передового опыта и должен предусматривать решения, оптимальные для общества. Стандарт может быть разработан как на материальные предметы (продукцию, сырье, образцы веществ), так и на нормы, правила, требования к объектам организационно-методического и общетехнического характера, порядок разработки документов, нормы безопасности, системы управления качеством и т.д.

Стандарты делятся на международные, межгосударственные, региональные, национальные, государственные, отраслевые, научно-технических и инженерных обществ, предприятий и другие виды.

Международный стандарт — стандарт, принятый международной организацией по стандартизации.

Межгосударственный стандарт (ГОСТ) — стандарт, принятый Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации или Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве.

Региональный стандарт — стандарт, принятый региональной организацией по стандартизации.

Международные и региональные стандарты (при условии присоединения к ним Российской Федерации), а также национальные стандарты других

стран (при наличии соответствующих соглашений с этими странами) применяют на территории Российской Федерации в качестве государственных.

Если международный, региональный или национальный стандарт другой страны, подлежащий применению, содержит ссылки на стандарты, не примененные в Российской Федерации, и при этом отсутствуют эквивалентные государственные стандарты, необходимо до его применения решить вопрос о применении этих стандартов.

Национальный стандарт — стандарт, принятый национальным органом по стандартизации.

Государственный стандарт Российской Федерации (ГОСТ Р) — стандарт, принятый Государственным комитетом Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт России) или Государственным комитетом Российской Федерации по вопросам архитектуры и строительства (Госстрой России).

Государственные стандарты разрабатывают на продукцию, работы и услуги, имеющие межотраслевое значение, и не должны противоречить законодательству Российской Федерации. Государственные стандарты должны содержать:

- требования к продукции, работам и услугам по их безопасности для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества, требования техники безопасности и производственной санитарии;
- требования по технической и информационной совместимости, а также взаимозаменяемости продукции;
- основные потребительские (эксплуатационные) характеристики продукции, методы их контроля, требования к упаковке, маркировке, транспортированию, хранению, применению и утилизации продукции;
- правила и нормы, обеспечивающие техническое и информационное единство при разработке, производстве, использовании (эксплуатации) продукции, выполнении работ и оказании услуг, в том числе правила оформления технической документации, допуски и посадки, общие правила обеспечения качества продукции, работ и услуг, сохранения и рационального использования всех видов ресурсов, термины и их определения, условные обозначения, метрологические и другие общетехнические и организационно-технические правила и нормы.

Отраслевой стандарт (отрасль — совокупность предприятий и организаций независимо от их территориального расположения и ведомственной принадлежности, разрабатывающих и (или) изготавливающих определенные виды продукции, относящиеся к номенклатуре продукции, закрепленной за министерством (ведомством), являющимся ведущим в ее производстве) — стандарт, принятый государственным компетентным органом управления.

Стандарт научно-технического, инженерного общества — стандарт, принятый научно-техническим, инженерным обществом или другим общественным объединением.

Стандарт предприятия — стандарт, утвержденный предприятием.

Комплекс стандартов — совокупность взаимосвязанных стандартов, объединенных общей целевой направленностью и устанавливающих согласованные требования к взаимосвязанным объектам стандартизации.

Основополагающий стандарт — стандарт, для широкой области распространения или содержащий общие положения для определенной области.

Идентичные стандарты — стандарты, идентичные по содержанию и форме представления.

Сопоставимые стандарты — стандарты на одну и ту же продукцию, процессы или услуги, утвержденные разными органами, занимающимися стандартизацией, в которых различные требования согласовываются на одних и тех же характеристиках и которые оцениваются с помощью одних и тех же методов, позволяющих однозначно сопоставить различия в требованиях.

Взаимоувязанные стандарты — два или несколько стандартов, устанавливающих совокупность взаимоувязанных требований.

Унифицированные стандарты — стандарты, которые идентичны по содержанию, но не полностью идентичны по форме представления.

Международная стандартизация — стандартизация, участие в которой открыто для соответствующих органов всех стран.

Региональная стандартизация — стандартизация, участие в которой принимают соответствующие органы стран только одного географического или экономического региона мира.

Национальная стандартизация — стандартизация, которая проводится на уровне одного государства.

Комплексная стандартизация — стандартизация, обеспечивающая согласование показателей взаимосвязанных объектов стандартизации и сроков введения их в действие, при которой существующие и разрабатываемые стандарты с точки зрения объектов и аспектов стандартизации необходимы и достаточны для реализации поставленной цели.

Опережающая стандартизация — стандартизация, при которой устанавливаются на основе разработанных прогнозов требования к объектам стандартизации, повышенные по отношению к уже достигнутому на практике уровню и подлежащие внедрению в будущем, начиная с определенного срока.

Местная стандартизация — стандартизация, проводимая на предприятиях (объединениях) и устанавливающая требования, нормы и правила, применяемые только на данном предприятии (объединении).

Стандартизация по достигнутому уровню — стандартизация, устанавливающая показатели, отражающие свойства существующей и освоенной продукции и таким образом фиксирующая достигнутый уровень ее производства.

Программа по стандартизации — план работ органа по стандартизации, в котором перечисляются названия текущих работ по стандартизации.

Область стандартизации — совокупность взаимосвязанных объектов стандартизации.

Аспект стандартизации — вид требований, предъявляемых к объекту стандартизации.

Технические условия (ТУ) — нормативный документ на конкретную продукцию (услугу), утвержденный предприятием-разработчиком, как правило, по согласованию с предприятием-заказчиком (потребителем).

Безопасность — отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения ущерба.

Охрана здоровья людей — защита здоровья людей от неблагоприятного воздействия продукции, работ (процессов) и услуг, окружающей среды.

Охрана окружающей среды — защита окружающей среды от неблагоприятного воздействия продукции, работ (процессов) и услуг.

Совместимость — пригодность продукции, процессов и услуг к совместному, не вызывающему нежелательных взаимодействий, использованию при заданных условиях для выполнения установленных требований.

Взаимозаменяемость — пригодность одного изделия, процесса, услуги для использования вместо другого изделия, процесса, услуги в целях выполнения одних и тех же требований.

Применение стандарта — использование стандарта его пользователями с выполнением требований, установленных в стандарте.

Применение международного, регионального или национального стандарта другой страны — использование международного, регионального или национального стандарта другой страны путем включения его полного содержания в отечественный нормативный документ по стандартизации.

Дата введения стандарта в действие — дата, с которой стандарт приобретает юридическую силу.

Пользователь стандарта — юридическое или физическое лицо, применяющее стандарт в своей научно-исследовательской, учебно-педагогической, опытно-конструкторской, производственной, технологической и других видах деятельности.

В практике международной стандартизации применяется термин *консенсус*, который трактуется как общее согласие, характеризующееся отсутствием возражений по существенным вопросам у большинства заинтересованных сторон, стремлением учесть мнения всех сторон и сблизить несовпадающие точки зрения. Но консенсус не предполагает полного единодушия.

15.2. Цели и задачи стандартизации

Основными целями стандартизации являются:

- защита интересов государства и потребителей в вопросах номенклатуры и качества продукции, услуг и применяемых процессов, обеспечивающих их

безопасность для жизни, здоровья людей и их имущества, охрану окружающей среды;

- повышение качества продукции в соответствии с развитием науки и техники, с потребностями населения и народного хозяйства;
- обеспечение совместимости и взаимозаменяемости продукции, а также развитие специализации в области проектирования и производства продукции;
- установление рациональной номенклатуры выпускаемой продукции;
- содействие экономии людских и материальных ресурсов, улучшению экономических показателей производства;
- устранение технических барьеров в производстве и торговле, обеспечение конкурентоспособности продукции на мировом рынке и эффективного участия государства в межгосударственном и международном разделении труда;
- развитие международного экономического, технического и культурного сотрудничества; создание условий для развития экспорта товаров, отвечающих современным требованиям мирового рынка;
- ускорение научно-технического прогресса, повышение эффективности общественного производства и производительности труда (в том числе инженерного и управленческого);
- обеспечение безопасности народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций;
- содействие повышению обороноспособности и мобилизационной готовности страны.

Основными задачами стандартизации являются:

- обеспечение взаимопонимания между разработчиками, изготовителями, продавцами и потребителями (заказчиками);
- установление оптимальных требований к номенклатуре и качеству продукции в интересах потребителя и государства, в том числе, обеспечивающих ее безопасность для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- установление требований по совместимости (конструктивной, электрической, электромагнитной, информационной, программной и др.), а также взаимозаменяемости продукции;
- согласование и увязка показателей и характеристик продукции, ее элементов, комплектующих изделий, сырья и материалов;
- унификация на основе установления и применения параметрических и типоразмерных рядов, базовых конструкций, конструктивно-унифицированных блочно-модульных составных частей изделий;
- установление метрологических норм, правил, положений и требований;
- нормативно-техническое обеспечение контроля (испытаний, анализа, измерений), сертификации и оценки качества продукции;

- создание и ведение систем классификации и кодирования технико-экономической информации;
- установление требований к технологическим процессам, в том числе для снижения материалоемкости, энергоемкости и трудоемкости, для обеспечения применения малоотходных технологий;
- нормативное обеспечение межгосударственных и государственных социально-экономических и научно-технических программ (проектов) и инфраструктурных комплексов (транспорт, связь, оборона, охрана окружающей среды, контроль среды обитания, безопасность населения и т.д.);
- создание системы каталогизации для обеспечения потребителей информацией о номенклатуре и основных показателях продукции;
- содействие выполнению законодательства Российской Федерации методами и средствами стандартизации.

15.3. Категории и виды стандартов Российской Федерации

При выборе объектов стандартизации необходимо однозначно определить категорию и вид предполагаемого к разработке стандарта, которые смогут обеспечить наибольший технико-экономический эффект от его внедрения. Исходя из этих же соображений должна быть определена и степень обязательности разрабатываемого стандарта. При решении этой задачи кроме проведения анализа перспективности применения стандартизуемого объекта, разработчикам стандарта необходимо иметь четкое представление об установленных государственной системой стандартизации и применяемых в промышленности категориях и видах стандартов — их назначении, содержании, построении и взаимосвязи и т. д.

Неправильное установление категории, вида или степени обязательности разработанного стандарта может привести к серьезным затруднениям при его внедрении в проектирование и производство и в значительной степени обесценить технико-экономический эффект стандартизации.

Категории стандартов

В Российской Федерации разрабатываются и применяются стандарты трех категорий:

- государственные стандарты — ГОСТ;
- отраслевые стандарты — ОСТ;
- стандарты предприятий — СТП.

Государственные стандарты обязательны к применению всеми предприятиями, организациями и учреждениями во всех отраслях народного хозяйства. Их действие распространяется преимущественно на объекты межотраслевого применения, нормы, требования, параметры, показатели качества продукции, термины, обозначения и пр., необходимые для обеспечения единст-

ва и взаимосвязи различных областей науки, техники и производства, а также на продукцию массового и крупносерийного производства широкого и межотраслевого применения.

Объектами государственной стандартизации обязательно должны быть:

- общетехнические и организационно-методические правила и нормы (ряды номинальных частот и напряжений электрического тока, предпочтительные числа, требования охраны природной среды, рационального использования природных ресурсов и пр.);
- межотраслевые требования и нормы техники безопасности и производственной санитарии;
- общие требования к продукции, имеющей межотраслевое применение (по устойчивости к воздействиям внешней среды, радиационной стойкости и т. д.);
- основные эксплуатационные свойства и технические характеристики групп однородной продукции, имеющей межотраслевое применение (сырья, материалов, машин, изделий, приборов) и методы их контроля;
- единицы физических величин, государственные эталоны единиц физических величин, правила государственных испытаний средств измерений, методы и средства поверки средств измерений, методики выполнения и нормы точности (погрешности) измерений;
- научно-технические термины, определения и обозначения;
- системы классификации и кодирования технико-экономической информации;
- системы конструкторской, технологической, управленческой документации, формы и системы организации производства.

Отраслевые стандарты обязательны к применению всеми предприятиями, организациями и учреждениями данной отрасли, а также предприятиями и организациями других отраслей, использующих продукцию этой отрасли. Отраслевые стандарты организационно-методического характера обязательны только для предприятий, организаций и учреждений утвердившего их министерства (ведомства). Отраслевые стандарты устанавливают требования к продукции, не относящейся к объектам государственной стандартизации и необходимые для обеспечения взаимосвязи в производственно-технической и организационно-управленческой деятельности предприятий, организаций и учреждений отрасли. К объектам отраслевой стандартизации относятся: изделия серийного и мелкосерийного производства; конкретные виды продукции, для которой государственными стандартами установлены общие технические характеристики; детали и сборочные единицы, технологическая оснастка и инструменты, сырье, материалы, полуфабрикаты, технологические нормы и типовые технологические процессы внутриотраслевого применения; методики выполнения и нормы точности измерений.

Иногда отраслевые стандарты могут ограничивать применение государственных стандартов для используемой в отрасли номенклатуры изделий, ти-

поразмеров и т.д. Однако при этом технические характеристики продукции, включенные в отраслевой стандарт, не могут быть ниже, чем в государственном стандарте.

Стандарты предприятия являются обязательными только для предприятия, разработавшего и утвердившего данный стандарт. Эти стандарты могут распространяться на внутренние нормы и правила в области управления и организации производства, управления номенклатурой и качеством продукции; на составные части разрабатываемых или изготавливаемых на предприятии изделий; оснастку и инструмент, типовые технологические процессы, методики измерений и контроля. Стандарты предприятия также могут с учетом особенностей конкретного предприятия ограничивать применение конкретной номенклатуры материалов, изделий, узлов и деталей, установленной стандартами других категорий.

Государственная система стандартизации устанавливает на продукцию и услуги стандарты предприятия всех категорий, которые в общем случае должны включать следующие разделы:

- общие технические условия и технические требования;
- классификацию, основные параметры и размеры;
- требования безопасности труда;
- требования охраны окружающей среды;
- типы, сортамент, марки и конструкцию;
- правила маркировки, упаковки, транспортировки и хранения продукции;
- методы контроля и испытаний;
- эксплуатацию с последующим ремонтом и утилизацией.

Обозначение государственного стандарта Российской Федерации состоит из индекса (ГОСТ Р), регистрационного номера и отделенных тире двух последних цифр года утверждения. При вхождении Госстандарта в комплекс стандартов в его регистрационном номере первые цифры с точкой определяют код системы. Далее структура обозначения включает номер классификационной группы и порядковый номер регистрации Госстандарта.

Пример обозначения: ГОСТ Р 2.41–99, где 2 — комплекс стандартов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД); 4 — код классификационной группы; 1 — разработан первым по порядку; 99 — утвержден в 1999 г.

Обозначение Госстандарта Российской Федерации, оформленного на основе применения аутентичного текста международного (или регионального) стандарта, состоит из индекса (ГОСТ Р), обозначения соответствующего международного стандарта и отделенных двоеточием года утверждения, который пишется полностью.

Пример обозначения: государственный стандарт Российской Федерации, оформленный на основе перевода стандарта ISO 9591:1999, имеет обозначе-

ние ГОСТ Р ИСО 9591-99; ИСО — Международная организация по стандартизации (см. ниже).

Обозначение стандарта отрасли состоит из индекса (ОСТ), условного обозначения министерства и регистрационного номера, присвоенного министерством по согласованию с Госстандартом, и отделенных тире двух последних цифр года утверждения.

Аналогично обозначению отраслевого стандарта строится структура обозначения стандартов предприятий (СТП) и научно-технического, инженерного общества и других общественных организаций и объединений (СТО).

Виды стандартов

В соответствии с единой государственной системой стандартизации и ГОСТ Р 1. 5-92 установлены следующие основные виды стандартов:

- стандарты основополагающие;
- стандарты на продукцию, услуги;
- стандарты на работы (процессы);
- стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа).

Основополагающие стандарты устанавливают общие организационно-технические положения для определенной области деятельности, а также общетехнические требования, нормы и правила, обеспечивающие взаимопонимание, техническое единство и взаимосвязь различных областей науки, техники и производства в процессах создания и использования продукции, охрану окружающей среды, безопасность продукции, процессов и услуг для жизни, здоровья, имущества и другие общетехнические требования.

Стандарты на продукцию (услуги) устанавливают требования к группам однородной продукции (услуг) или к конкретной продукции (услуге).

Стандарты на работы (процессы) устанавливают основные требования к методам (способам, приемам, режимам, нормам) выполнения различного рода работ в технологических процессах разработки, изготовления, хранения, транспортирования, эксплуатации, ремонта и утилизации продукции.

Стандарты на методы контроля устанавливают методы (способы, приемы, методики и др.) проведения испытаний, измерений, анализа продукции при ее создании, сертификации и использовании.

В соответствии с единой государственной системой стандартизации установлены следующие основные виды стандартов, распространяющихся на определенную продукцию (услугу):

- стандарт технических условий (общих технических условий);
- стандарт типов и основных параметров (размеров);
- стандарт конструкции и размеров;
- стандарт технических требований;
- стандарт сортамента;
- стандарт марок;

- стандарт методов испытаний;
- стандарт правил приемки;
- стандарт правил маркировки, упаковки, хранения и транспортировки;
- стандарт правил эксплуатации и ремонта;
- стандарт типовых технологических процессов;
- стандарт на методы и средства поверки измерительных приборов.

Стандарт технических условий разрабатывается на конкретный продукт (или группу однородной продукции) и должен охватывать его основные показатели: конструкцию и размеры; технические требования; правила приемки, контроля, маркировки, упаковки, хранения, транспортировки и пр. При стандартизации группы однородной продукции рекомендуется выпускать стандарт общих технических условий и развивающие его отдельные стандарты технических условий на конкретные типы (марки, модели и т.д.).

Стандарт общих технических условий разрабатывается на группу однотипных изделий, для которых возможно и целесообразно установить единые нормы качества, например, на изделия микроэлектроники, приборы полупроводниковые, приборы радиоизмерительные. Такие стандарты должны устанавливать общие эксплуатационные требования и характеристики изделий, методы контроля устанавливаемых требований и характеристик, общие правила приемки готовых изделий, общие требования к хранению и транспортировке изделий, указания по эксплуатации и ремонту, гарантии поставщика и т.д.

Стандарт типов и основных параметров (размеров) регламентирует кроме основных параметров и размеров также типы и виды изделий по основным эксплуатационным характеристикам. При этом тип означает родовое понятие, а не конкретную разновидность и объединяет группу однотипных изделий. Стандарты этого вида используются только при проектировании и на них нельзя ссылаться в стандартах или технических условиях на поставку конкретной продукции.

Стандарт конструкции и размеров устанавливает конкретную конструкцию и основные размеры для определенной группы изделий. Этот вид стандарта разрабатывается преимущественно на изделия, основными показателями которых являются конструктивное решение и основные габаритные, установочные и присоединительные размеры: металлоемкие изделия, не требующие для изготовления сложной технологической оснастки; изделия, для которых не представляется возможным регламентировать некоторые элементы конструкции или присоединительные размеры в связи с различными условиями их применения или использования.

Стандарт технических требований устанавливает требования и нормы, определяющие основные эксплуатационные свойства изделий:

- конструктивные требования (требования к внешнему виду, весу, габаритным размерам);

- требования к комплектности поставки;
- требования к электрическим параметрам и режимам;
- требования к устойчивости при механических и климатических воздействиях;
- требования к электрическому монтажу и прочности электрической изоляции;
- требования к заземлению;
- требования к защите от электрических помех;
- требования к надежности и долговечности;
- требования к безопасности эксплуатации и санитарии;
- требования к маркировке, укладке, упаковке, хранению и транспортировке.

Данный стандарт должен обеспечивать оптимальные показатели качества при разработке и изготовлении изделий.

Стандарт технических требований необходимо соблюдать как при разработке новых изделий, так и при изготовлении уже освоенных производством. На стандарты этого вида можно ссылаться в других стандартах или технических условиях на поставку конкретных видов и типоразмеров изделий.

Стандарт сортамента регламентирует геометрические формы, размеры и другие требования к сортаменту, а также методы их контроля.

Стандарт марок устанавливает номенклатуру марок материала, их химический состав, а в отдельных случаях — основные потребительские свойства и методы их контроля.

Стандарт методов испытаний регламентирует методы испытаний (контроля, измерения) технических требований, определяющих качественные показатели изделий. Стандарт может устанавливать методы испытаний как всех эксплуатационных свойств группы изделий, так и некоторых из них или даже какого-нибудь одного требования (свойства, параметра, показателя). Стандарты этого вида должны содержать кроме описания методов испытаний также требования к испытательной и измерительной аппаратуре, условия проведения испытаний и порядок определения их результатов.

Стандарты правил приемки устанавливают единый унифицированный порядок приемки для какой-либо группы изделий. Стандарты этого вида устанавливают порядок приемки готовых изделий органами технического контроля предприятия-изготовителя и контрольной проверки их представителями заказчика (потребителя). Применительно к конкретной группе изделий в стандарте должны быть также установлены виды испытаний, например приемо-сдаточные, периодические (типовые), контрольные, определены периодичность их проведения, номенклатура проверяемых параметров и последовательность их проверки.

Стандарт правил маркировки, упаковки, хранения и транспортировки определяет единые для группы изделий требова-

ния к маркировке, упаковке, хранению и транспортировке. Данный вид стандартов регламентирует требования к маркировке определенных групп продукции с целью информации потребителя об эксплуатационных свойствах и параметрах изделий, устанавливает правила хранения, упаковки и транспортировки, необходимые для обеспечения сохранности качественных показателей и товарного вида изделий, а также рационального использования транспортных средств.

Стандарт правил эксплуатации и ремонта определяет общие для группы изделий правила их эксплуатации и ремонта. Эти стандарты разрабатываются с целью обеспечения рациональной эксплуатации и ремонта изделий для сохранения их работоспособности, эксплуатационных характеристик и параметров.

Стандарт типовых технологических процессов широко применяется в последние годы. Особое значение получили специальные технологические процессы и отдельные операции, такие, как вакуумное напыление тонких пленок на диэлектрики при изготовлении микросхем, изготовлении печатного электро монтажа на печатных платах, фотохимическое нанесение изображений и пр. Разработка и освоение этих процессов требуют проведения трудоемких и сложных экспериментальных работ и во многих случаях специального технологического оборудования и контрольно-измерительной и испытательной аппаратуры. Отраслевые стандарты на типовые технологические процессы и технологические нормы обычно используются технологами заводов-изготовителей при разработке технологических процессов изготовления конкретных видов изделий. В технологической карте на конкретное изделие изготовителем дается ссылка на отраслевой стандарт или непосредственно приводятся данные из стандарта типового технологического процесса или стандарта на технологические нормы.

Стандарт на методы и средства поверки измерительных приборов устанавливает единые для группы измерительных устройств требования *на методы и средства их поверки*, а также включает вопросы соответствия средств измерений установленным метрологическим нормам и требованиям в распространяющихся на них нормативных документах. Конкретная номенклатура рабочих средств измерений, подлежащих обязательной государственной или ведомственной поверке, утверждается и издается Госстандартом Российской Федерации.

Государственной системой стандартизации РФ, кроме обязательных стандартов предусмотрена также (вспомогательная) категория *руководящих технических материалов* (РТМ). Особенно широко эта категория документов распространена в радиоэлектронной промышленности. Руководящие технические материалы эффективно способствуют унификации продукции.

Руководящие технические материалы разрабатывают в тех случаях, когда нецелесообразно или невозможно установление обязательного стандарта:

- если отступление от применения объекта (требования, правила, метода, методики, положения) не оказывает существенного влияния на результаты его применения;

- если в данный момент невозможно установить достаточно достоверные или наиболее прогрессивные значения отдельных параметров или эксплуатационных характеристик объекта — это касается, например, внедрения стандартов на новые виды материалов;

- если внедрению нового стандарта не благоприятствуют конъюнктурные условия предприятий, например, отсутствие предусмотренного оборудования, необходимого для применения типового технологического процесса, если, конечно, при этом не ухудшается качество готового изделия.

Руководящие технические материалы, утвержденные вышестоящими организациями (министерствами, ведомствами), при необходимости могут внедряться на отдельных предприятиях или группах предприятий как обязательные директивными документами руководителей главных управлений, объединений, предприятий и организаций.

15.4. Основные принципы и методы стандартизации

Основные принципы стандартизации. Основные результаты действия стандартизации оценивают по тем изменениям, которые она внесла в развитие научно-технического прогресса и хозяйственную деятельность. Для того чтобы стандартизация была эффективной, при ее проведении необходимо соблюдение определенных принципов.

Системный подход в стандартизации — направление практической деятельности, в основе которого лежит рассмотрение объектов стандартизации как систем. В основу этого подхода заложена *система* — целое, составленное из частей или, в современном понимании, — множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом и образующих определенную целостность, единство. При использовании системного подхода в стандартизации необходимо ориентироваться на раскрытие целостности объекта, выявление многообразных типов связей в нем и сведение их в единую теоретическую картину.

Системный подход оказался необходимым методологическим средством стандартизации, используемым при изучении сложных технических конструкций, интерпретации их устройства и функций посредством норм, показателей и описаний. Наиболее простое представление об объектах стандартизации дает вид и тип системы одинаковых или аналогичных предметов и изделий. Начиная с производства, объекты стандартизации усложняются за счет структуры и развития связей.

Научный подход в стандартизации основан на том, что показатели, нормы, характеристики и требования, включаемые в стандарт,

должны соответствовать передовому уровню науки и техники и основываться на результатах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В связи с этим разработка всех видов и категорий стандартов должна вестись с учетом и использованием научных достижений в соответствующих областях, а в необходимых случаях разработке стандартов должно предшествовать проведение научно-исследовательских работ.

Целенаправленность и технико-экономическая целесообразность характеризуются тем, что проведение работ по стандартизации, разработка любого стандарта должны быть обоснованы и направлены на решение конкретных задач на соответствующих уровнях производства и управления.

Прогрессивность и оптимальность стандарта следует из самой сути стандартизации, отраженной в ее определении. Новые стандарты на продукцию должны не только отвечать современным запросам и конъюнктуре, но и учитывать тенденции развития соответствующих отраслей.

При разработке стандартов необходимо стремиться получить оптимальное сочетание устанавливаемых показателей, норм и требований к продукции с затратами на их достижение, обеспечить *максимальный экономический эффект при минимальных затратах*.

Необходимость взаимной увязки стандартов связана с основными целями и задачами стандартизации. Показатели, параметры, нормы, характеристики, требования, устанавливаемые в стандартах, разрабатываемых в Российской Федерации, должны также соответствовать международным стандартам и учитывать рекомендации международных организаций.

Принцип комплексности стандартизации — один из основных принципов. Практика стандартизации привела к двум взаимосвязанным направлениям ее осуществления: от частного к целому; от целого к частному.

Первое направление связано с развитием стандартизации снизу вверх — от стандартизованных общих конструктивных деталей и элементов к машинам, аппаратам, приборам. Оно характерно для тех изделий общего применения, которые изготавливают на специализированных заводах массового производства.

Второму направлению соответствует развитие стандартизации сверху вниз, т.е. от стандартизации основных параметров сложных объектов производства (систем, машин, приборов) к стандартизации составляющих их элементов (агрегатов, узлов, деталей).

Принцип взаимозаменяемости изделий — свойство независимо изготавливаемых деталей и сборочных единиц занимать свое место в изделии без дополнительной обработки. Данный принцип позволяет в процессе монтажа и замены технических конструкций (оборудования, приборов, аппаратов, механизмов, агрегатов) исключить необходимость в подгонке.

Взаимозаменяемость обеспечивают путем установления в стандартах, чертежах, нормативных документах и другой технической документации единых номинальных размеров для сопрягаемых деталей, соответствующих допустимых пределов размеров, геометрических форм и расположения поверхностей и регламентирующих требований к качеству материалов. Взаимозаменяемые детали должны быть одинаковыми по размерам, массе, форме, твердости, физико-химическим свойствам и многим другим параметрам, установленным соответствующими стандартами. Различают функциональную и геометрическую взаимозаменяемость изделий.

Функциональная взаимозаменяемость предусматривает обеспечение физико-химических и эксплуатационных показателей без нарушения технических требований к конкретному изделию. Функциональная взаимозаменяемость предполагает не только возможность нормальной сборки, но и нормальную работу изделия после установки в нем новой детали или другой составной части взамен вышедшей из строя. Стандарты на продукцию в необходимых случаях должны устанавливать нормы и требования, обеспечивающие функциональную взаимозаменяемость изделий.

Геометрическая взаимозаменяемость — вид взаимозаменяемости, при которой обеспечивается сборка изделия по геометрическим параметрам с учетом размеров, формы и расположения деталей.

Принцип предпочтительности используется при разработке стандартов на изделия широкого применения, решении задач рационального выбора и установления градаций количественных значений параметров изделий, проведении унификации, типизации и должен основываться на использовании рядов предпочтительных чисел. Установление на их основе рядов параметров, с одной стороны, препятствует неоправданному расширению номенклатуры и типоразмеров разрабатываемых изделий, а с другой — позволяет установить такие их технико-экономические характеристики, которые соответствуют современным требованиям, а также учесть перспективы развития соответствующих видов продукции.

Требования научно-технического прогресса и разработка конкурентоспособной продукции вынуждают производителей, в том числе и российских, создавать и выпускать все более совершенные изделия одного и того же назначения. Исключить неоправданно большую номенклатуру этих изделий и обеспечить согласование между собой их параметров и размеров можно лишь на основе создания стандартов параметров. Суть «параметрической» стандартизации заключается в том, что параметры изделий массового производства устанавливаются по определенным правилам, на основе рядов предпочтительных чисел.

Прежде чем рассматривать этот принцип предпочтительности, отметим, что практически все системы согласования параметров строятся на трех основных правилах:

- *пропорциональности* — параметры объекта пропорциональны одному главному параметру;
- *аддитивности* — параметры объекта укладываются в ряды чисел, образуемых путем последовательного сложения;
- *мультипликативности* — параметры объекта укладываются в ряды чисел, образуемых путем умножения на постоянный множитель.

Проанализируем более подробно принцип предпочтительности, заключающий в себе теоретическую основу стандартизации — систему предпочтительных чисел.

Согласно принципу предпочтительности необходимо установить *набор установленных значений* параметров, удовлетворяющих следующим требованиям:

- представлять рациональную систему градаций с учетом потребностей производства и эксплуатации;
- иметь бесконечное число возрастающих (или убывающих) значений;
- включать все десятичные значения любого числа и единицу;
- быть простыми и легко запоминающимися.

В Российской Федерации действует система предпочтительных чисел (рекомендована Международной организацией по стандартизации), устанавливающая предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел (ряды R).

Специальные исследования показали, что наиболее оптимальными являются ряды, построенные по геометрической прогрессии. Геометрическая прогрессия — это ряд чисел, в котором каждое последующее число получается умножением предыдущего на знаменатель прогрессии. Преимущество геометрической прогрессии состоит в том, что в любом интервале процент увеличения величины числа является неизменным; недостаток — все ее члены обязательно округляются.

Пусть имеется геометрический ряд, в котором $a_1, a_2, \dots, a_i, a_n$ — члены прогрессии. В ряде, построенном на основе геометрической прогрессии, постоянен ее знаменатель w , т.е. отношение последующего члена ряда к предыдущему:

$$w = a_{n+1}/a_n.$$

Итак, каждый последующий член ряда является произведением предыдущего члена на знаменатель ряда w . В этом случае любой i -й член геометрической прогрессии можно вычислить по формуле:

$$a_i = a_1 w^{i-1}.$$

Например, при $a_1 = 1$ и $w = 2$ имеем ряд 1, 2, 4, 8, 16, ... , а при $w = 1,4$ — ряд 1; 1,4; 2; 2,8, ...

Ряды, построенные на основе геометрической прогрессии, обладают следующими свойствами:

- произведение или частное любых двух из двух его членов является членом ряда;

- любой член ряда, возведенный в целую положительную степень, также является членом этого ряда.

Из этих свойств следует, что зависимости, определяемые из произведений членов ряда или их степеней, всегда подчиняются закономерностям этого ряда. Так, например, при выборе длин сторон прямоугольника из ряда предпочтительных чисел, его площадь будет членом этого ряда.

Менее удобны, но иногда находят применение ряды, построенные на основе арифметической прогрессии. Известно, что в арифметической прогрессии разность между ее соседними членами постоянна. Любой член арифметической прогрессии можно вычислить по формуле

$$a_n = a_1 + b(n - 1),$$

где a_1 — первый член прогрессии; b — разность прогрессии; n — номер члена.

В частности, последовательность чисел 1, 2, 3, 4, 5, ... представляет арифметическую прогрессию, возрастающую с разностью 1. Последовательность чисел 1; 0,75; 0,5; 0,25 ... — арифметическая прогрессия, убывающая с разностью 0,25.

Несмотря на простоту, ряды предпочтительных чисел, построенные на основе арифметической прогрессии, имеют существенный недостаток — неравномерность ряда. Данный недостаток и ограничивает их применение. Так, в приведенной выше возрастающей последовательности с разностью 1, второй член ряда превышает первый на 100 %, десятый больше девятого на 11 %, а сотый больше девяносто девятого всего на 1 %. В результате большие числа следуют друг за другом с очень малыми интервалами (слишком часто), что не всегда экономически оправдано и рационально. Для устранения этого существенного недостатка используют ступенчатые ряды, составленные из отрезков арифметических рядов с различными разностями. По такому принципу, например, построен ряд номиналов монет Российской Федерации — 1, 2, 5 рублей.

Международной организацией по стандартизации рекомендовано для построения рядов предпочтительных чисел на основе геометрической прогрессии использовать такие ряды, в которых происходит десятикратное увеличение каждого следующего n -го члена. Наиболее удобными для практики были признаны ряды, у которых первый член $a_1 = 1$ и знаменатель $w = \sqrt[10]{10}$.

Стандартом установлено четыре основных ряда предпочтительных чисел, обозначаемых $R 5$, $R 10$, $R 20$, $R 40$ и один дополнительный $R 80$, значения w для которых соответственно равны

$$\begin{aligned}
 R\ 5 \dots\dots w &= \sqrt[5]{10} \approx 1,6; \\
 R\ 10 \dots\dots w &= \sqrt[10]{10} \approx 1,25; \\
 R\ 20 \dots\dots w &= \sqrt[20]{10} \approx 1,12; \\
 R\ 40 \dots\dots w &= \sqrt[40]{10} \approx 1,06; \\
 R\ 80 \dots\dots w &= \sqrt[80]{10} \approx 1,03.
 \end{aligned}$$

Ряды предпочтительных чисел, приведенные в стандарте, включают их значения в диапазоне от 0 до ∞ , полученные для величин a_1 , лежащих в интервале $1 < a \leq 10$. Для перехода от чисел этого интервала в любой другой десятичный интервал необходимо умножить соответствующее число на 10^k , где k — целое положительное или отрицательное число. Например, при $k = 1$ все числа ряда перейдут в интервал $10 < a \leq 100$, а при $k = -1$ — в интервал $0,1 < a \leq 1$.

Допускается также использовать производные ряды, которые образуются из основных путем отбора каждого второго, третьего или в общем случае каждого n -го члена ряда. В частности, ряд, обозначенный как $R\ 40/5$, включает в себя каждый пятый член ряда $R\ 40$.

В основу построения предпочтительных чисел Российской Федерации положен ряд $R\ 40$ с параметрами от 0 до 10 (табл. 15.1).

Таблица 15.1. Ряды предпочтительных чисел

Номер числа	Номер ряда			
	$R\ 40$	$R\ 20$	$R\ 10$	$R\ 5$
0	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,06			
2	1,12	1,12		
3	1,18			
4	1,25	1,25	1,25	
5	1,32			
6	1,40	1,40		
7	1,50			
8	1,60	1,60	1,60	1,60
9	1,70			
10	1,80	1,80		

В радиотехнике, кроме рядов R , для выражения числовых параметров ряда электрических величин используются числа, построенные по рядам согласно рекомендациям Международной электротехнической Комиссии (МЭК). Для этих рядов (ряды E) $w = \sqrt[n]{10}$ и $n = 3, 6, 12, 24$. Примером применения рядов E могут служить ряды номинальных значений сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов.

Основные методы стандартизации

В зависимости от метода решения главной задачи стандартизации различают несколько ее основных форм: симплификацию, унификацию, типизацию и агрегатирование.

Симплификация заключается в простом сокращении числа применяемых при разработке изделия или при его производстве марок и сортов материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий и пр., до количества, технически и экономически целесообразного, достаточного для выпуска изделий с требуемыми показателями качества. Являясь простейшей формой и начальной стадией более сложных форм стандартизации, симплификация оказывается экономически выгодной, так как приводит к упрощению производства, облегчает отчетность, материально-техническое снабжение, складирование изделий.

Унификация — выбор оптимального числа разновидностей продукции, процессов и услуг, значений их параметров и размеров. Она заключается в рациональном сокращении числа типов, видов и размеров объектов одинакового функционального назначения и направлена на уменьшение числа разновидностей путем комбинирования двух или более разновидностей.

Наиболее часто объектами унификации являются отдельные изделия, их составные части, детали, комплектующие элементы и т.д. Проводится унификация на основе анализа конструктивных вариантов изделий, их применимости, путем сведения близких по назначению, конструкции и размерам изделий, их составных частей и деталей к единой типовой конструкции. При необходимости в конструкцию унифицируемых изделий и их элементов вносят технические усовершенствования и доработки.

Типизация — форма стандартизации, заключающаяся в разработке и установлении типовых решений (конструктивных, технологических, организационных и т.д.) на основе наиболее прогрессивных методов и режимов работы. Определение «типизация» непосредственно связано с понятиями:

- *типоразмер изделия* — характеристика, определяющая отличие изделия от других изделий этой же конструкции (типа) хотя бы числовым значением любого параметра;

- *типоразмерный ряд* — совокупность типоразмеров изделия, построенная в соответствии с числовыми значениями одного из конкретных его параметров.

Применительно к разрабатываемым конструкциям типизация заключается в том, что некоторое конструктивное решение (существующее или специально разработанное) принимается за основное — базовое для нескольких одинаковых или близких по функциональному назначению изделий. Требуемая же номенклатура и варианты изделий строятся на основе базовой конструкции путем внесения в нее ряда второстепенных изменений и дополнений.

Агрегатирование — метод создания новых машин, приборов и другого оборудования путем компоновки конечного изделия из ограниченно-

го набора стандартных и унифицированных узлов и агрегатов, обладающих геометрической и функциональной взаимозаменяемостью. Возможность многократного применения элементов набора в различных модификациях машин, устройств и приборов одного и того же класса или близких по назначению, решает ряд специфических задач: обеспечивает конструктивную преемственность при разработке и создании новых изделий; позволяет использовать освоенные на производстве узлы и агрегаты; значительно сокращает трудоемкость проектирования, изготовления, наладки и ремонта изделий; улучшает качество продукции; повышает уровень взаимозаменяемости продукции; способствует специализации предприятий, механизации и автоматизации производственных процессов, а также облегчает перестройку производства при переходе предприятий на освоение новой продукции.

Отметим еще ряд специфических методов стандартизации.

Принцип расчленения является основной предпосылкой для развития нового метода создания оборудования, полностью отвечающего требованиям производства для рационального агрегатирования. Основное и принципиальное преимущество этого метода состоит в том, что в условиях специализированного производства агрегатов и поставки их «россыпью» (т. е. в виде отдельных деталей, узлов и пр.), потребители получают возможность компоновать необходимое оборудование. Приобретение подобных агрегатов позволяет производителям удешевить и упростить ремонт машин, изготавливаемых на специализированных предприятиях.

Специализация производства — организационно-технические мероприятия, направленные на создание технологий по выпуску однотипной продукции в крупносерийном масштабе при наилучшем качестве и минимальной себестоимости. При рассмотрении объектов стандартизации различают предметную, подельную и технологическую виды специализации. В зависимости от области распространения специализация может быть международной, межотраслевой и отраслевой.

Программно-целевой метод относится к одному из важнейших методов стандартизации и заключается в разработке и практической реализации комплексных целевых программ по наиболее важным научно-техническим, экономическим и социальным проблемам общества. При этом обязательно не только широкое обобщение практического опыта, но и проведение теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских работ, необходимых для разработки стандартов и их успешного внедрения.

В последние годы стратегическим направлением развития технических систем во многих странах стало *модульное формирование техники* (МФТ), являющееся высшей формой стандартизации. Суть МФТ заключается в комплектовании сложных комплексов с большим разнообразием характеристик и типоразмеров из одинаковых первичных (типовых или стандартных) общих элементов-модулей.

15.5. Государственные и отраслевые системы стандартов на общетехнические нормы и требования

Важную роль в организации и проведении работ на всех стадиях разработки и развития изделия играет стандартизация общих норм, правил и требований. Эти нормы в значительной степени совпадают с общепромышленными нормами, регламентируемыми государственными стандартами; в этом случае отраслевые стандарты или стандарты предприятия разрабатываются, как уже говорилось ранее, в развитие, дополнение и ограничение государственных стандартов с учетом специфических условий деятельности отрасли или предприятия.

По назначению и содержанию общие нормы стандартизации принято делить на следующие группы:

- организационно-методические;
- общетехнические;
- проектно-конструкторские;
- производственно-технологические.

К *организационно-методическим нормам* относятся нормы, требования и правила, устанавливающие организацию проведения работ на всех стадиях создания и развития продукции и во всех сферах деятельности предприятий и организаций. Регламентация данных норм в стандартах позволяет создать основу для наиболее рациональной организации проектирования и производства изделий, а также установить четкие служебные обязанности функциональных подразделений предприятия и производственные связи между ними.

К этой группе относятся нормы, регламентирующие организацию и методику проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию новых видов изделий, организацию и методику проведения работ по унификации и стандартизации в радиоэлектронной промышленности, положения о взаимоотношениях проектирующих и производственных предприятий при изготовлении и испытании опытных образцов радиоэлектронной аппаратуры и передачи их в серийное производство. Кроме того, организационно-методические нормы устанавливают порядок разработки, изготовления, испытаний и утверждения опытных образцов новых изделий для экспорта, положения о различных функциональных службах предприятий и их структурных подразделений и т.д.

Основополагающим нормативно-техническим документом, регламентирующим организацию и методику проведения работ по стандартизации, является комплекс стандартов, определяющий следующие установки:

- порядок планирования работ по стандартизации и унификации;
- порядок разработки, утверждения, регистрации и издания стандартов;
- порядок составления технических отчетов о работах в области стандартизации;

- порядок внедрения на предприятиях и в организациях стандартов всех категорий;
- принцип учета применяемости стандартов, а также стандартизованных и унифицированных изделий;
- методику подсчета экономической эффективности работ по стандартизации;
- порядок определения уровня унификации изделий;
- методику проведения унификации на всех этапах создания и развития продукта и т.д.

Государственные и отраслевые стандарты *на общетехнические нормы* устанавливают единые термины, понятия, обозначения, а также требования к технической и другой служебной документации, применяемой во всех сферах человеческой деятельности. Это стандарты, регламентирующие обозначения технических величин, единицы измерения, систему конструкторской документации, систему нормативно-технической документации, систему технологической, товаросопроводительной и других видов документации.

В радиоэлектронной промышленности общетехнические нормы большей частью совпадают с общепромышленными нормами, регламентируемыми государственными стандартами. Однако некоторая часть общетехнических норм относится только к радиоэлектронной технике. В частности, это обозначение радиотехнических величин и величин импульсной техники, термины и обозначения, применяемые при разработке и эксплуатации отдельных групп и видов радиоэлектронной аппаратуры (вычислительная техника, телевидение, измерительная техника, подвижная и проводная связь, радиосвязь).

Рассмотрим ряд основных проектно-конструкторских и производственно-технологических документов.

В сфере производства в отраслях Российской Федерации установлены и действуют единые государственные системы стандартов, которые обеспечивают единообразие и эффективность проведения важнейших видов работ, общих для различных отраслей хозяйства. К ним прежде всего относятся: Государственная система стандартизации (ГСС); Государственная система обеспечения единства измерений (ГСОЕИ, упрощенно — ГСИ); Единая система классификации и кодирования технико-экономической информации (ЕСККТИ); Единая система конструкторской документации (ЕСКД); Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП); Единая система технологической документации (ЕСТД); Государственная система стандартов безопасности труда (ГССБТ).

Государственная система обеспечения единства измерений. Важной особенностью метрологии является ее законодательный характер благодаря действию в нашей стране комплекса государственных стандартов, объединенных в Государственную систему обеспечения единства измерений (ГСИ). Точные и достоверные измерения обеспечивают

соответствие выпускаемой продукции требованиям стандартов, техническим условиям и другой нормативно-технической документации. Таким образом, измерения лежат в самой основе производства и в значительной мере определяют возможность получения качественной продукции.

Огромное разнообразие измеряемых физических величин, методов и средств измерений, применяемых в народном хозяйстве, потребовали разработки в рамках ГСС единой системы метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции, научных исследований и других видов деятельности во всех отраслях хозяйства.

Единая десятичная система классификации и кодирования технико-экономической информации. Современный технический прогресс промышленности и связанное с этим увеличение потоков информации требуют оперативной ее обработки для планирования, учета и эффективной координации деятельности предприятий и отраслей. Этой цели служит общегосударственная автоматизированная система сбора и обработки информации на базе государственной системы вычислительных центров и единой автоматической сети связи страны. Работа автоматизированной системы требует применения языка программирования низкого уровня — Ассемблера, т.е. перевода технико-экономической информации на язык цифровых кодов. Для этого создана Государственная система классификации и кодирования, включающая комплекс взаимосвязанных общесоюзных классификаторов промышленной и сельскохозяйственной продукции, конструкторской документации и технологический классификатор.

Система классификации объектов технико-экономической информации — это совокупность правил, определяющих распределение объектов по классам (классификационным группам) на основании общих признаков, присущих объектам данного рода и отличающих их от других. В основу классификации закладывается логическая последовательность признаков, при этом процесс кодирования предмета существенно упрощается, поскольку осуществляется в однозначном соответствии с принятой системой классификации. Кодирование технико-экономической информации на основе системы классификации позволяет непосредственно по коду объекта судить о его характеристиках (конструктивных, технологических, эксплуатационных). Система классификации и кодирования обеспечивает четкую систематизацию всех объектов по их техническим и экономическим характеристикам с присвоением каждому объекту единого уникального кода.

В Российской Федерации разработан и действует *Общероссийский классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции* (ОКП). Он представляет собой систематизированный свод кодов и наименований выпускаемой продукции, иначе говоря, ОКП — это в некотором роде словарь, предназначенный для кодирования изделий цифровыми кодами для последующей компьютерной обработки. В основу ОКП заложена *Единая*

десятичная система классификации промышленной и сельскохозяйственной продукции (ЕДСКП).

В классификации установлен принцип последовательной конкретизации классификационных группировок. Вся выпускаемая в стране продукция подразделяется на 100 классов в соответствии с отраслями производства и конкретизируется по свойствам и назначению продукции. Затем каждый класс делится на 10 подклассов, каждый подкласс — на 10 групп, каждая группа — на 10 подгрупп и каждая подгруппа — на 10 видов. Каждый вид может включать до 9999 конкретных наименований продукции. Перечисленные ступени деления продукции используются для кодирования групповой номенклатуры продукции.

Единая система конструкторской документации. Для радиотехники из общетехнических норм наиболее важное значение имеет система конструкторской документации, устанавливающая единые правила и требования к разработке, выполнению, оформлению, обозначению, учету, хранению и изменению конструкторской документации, включая эксплуатационную и ремонтную документацию. Эта система регламентирована в комплексе государственных стандартов под общим наименованием Единая система конструкторской документации. Ряд положений, установленных ЕСКД, должен быть положен в основу при разработке систем технологической и другой служебной документации. В ЕСКД установлены единые правила выполнения конструкторских документов на однотипные изделия и систему их обозначений.

В радиотехнике часто необходимо разработать специальную конструкторскую документацию на изделие в тропическом, экспортном или другом исполнении, несмотря на то, что ранее были выпущены конструкторские документы на это изделие в обычном исполнении. ЕСКД предусматривает возможность дополнения ранее выпущенных конструкторских документов данными, необходимыми для изготовления аналогичных изделий в тропическом, экспортном или ином исполнении.

При разработке Единой системы конструкторской документации были использованы многие правила и положения, установленные в *межведомственных нормах Системы чертежного хозяйства (МНСЧХ)*, широко внедренных в приборостроительные отрасли и в том числе в радиоэлектронной промышленности. В то же время ЕСКД устанавливает целый ряд принципиально новых положений, отвечающих современным требованиям организации проектирования, отработки и производства изделий.

Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП). Важным звеном в обеспечении качества выпускаемой продукции является *технологическая подготовка производства (ТПП)*.

В процессе изготовления изделий производится доводка их качества. Современному объекту производства свойственно значительное количество

изменений и модификаций конструкции и технологии изготовления, т.е. практически работы по технологической подготовке не прекращаются до смены объекта производства. В технологической подготовке производства есть круг общих вопросов, не зависящих от отраслевой принадлежности предприятий, например методы технологической классификации и кодирования деталей, сборочных единиц, технологических процессов, оборудования, оснастки, инструмента, формы конструкторской и технологической документации и пр. Ответы на все эти вопросы и дает ЕСТПП. Как единая структура стандартов ЕСТПП выдвигает ряд требований к другим общетехническим и отраслевым системам, таким, как классификация и кодирование элементов ТПП; построение системы информации; типизация и стандартизация средств и технологических процессов основного и вспомогательного производства; стандартизация правил оформления технологической и организационно-технической документации. Все это регламентируется стандартами Единой системы технологической документации.

Единая система технологической документации (ЕСТД) — взаимосвязанный комплекс государственных стандартов, устанавливающих:

- формы документации общего назначения;
- правила оформления технологических процессов и формы документации, в частности, применительно к процессам, специфичным для отраслей радиотехники, электроники и пр.

15.6. Организация работ по стандартизации.

Государственный надзор за соблюдением стандартов

Государственное управление деятельностью по стандартизации (в том числе и в области метрологии и метрологического обеспечения) на всех уровнях управления хозяйством в Российской Федерации осуществляет Госстандарт России. Другие министерства, ведомства и органы государственного управления организуют деятельность по стандартизации в пределах их компетенции. Госстандарт России несет полную ответственность за состояние и дальнейшее развитие стандартизации, а также проведение единой технической политики в области стандартизации, сертификации и метрологии.

Организация работ по стандартизации

Основными задачами Госстандарта России являются:

- определение основных направлений развития и разработка научно-методических и технико-экономических основ стандартизации, сертификации и метрологии;
- государственный надзор за соблюдением стандартов и ТУ, состоянием и применением измерительной техники в отраслях хозяйства;

- стандартизация основных показателей качества продукции в области радиоэлектроники, общих требований к ее разработке, производству, приемке и методам испытаний и измерений, организация работы по аттестации и сертификации качества промышленной продукции в стране;

- развитие унификации промышленных изделий как важнейшего условия специализации, комплексной механизации и автоматизации производства;

- обеспечение единства и достоверности измерений в стране, укрепление и развитие государственной метрологической службы и эталонной базы, создание новых и совершенствование существующих методов и средств измерений высшей точности;

- стандартизация методов и средств измерений, контроля и испытаний, а также значений физических констант, аттестация стандартных образцов веществ, материалов и изделий;

- организация и проведение государственных испытаний средств измерений.

В соответствии с этими задачами Госстандарт России выполняет следующие функции:

- представляет в установленном порядке Российскую Федерацию в международных организациях по вопросам стандартизации и метрологии;

- разрабатывает проекты перспективных и годовых планов государственной стандартизации (и представляет их на утверждение Правительству Российской Федерации или утверждает), рассматривает и согласовывает проекты планов отраслевой и территориальной стандартизации;

- осуществляет методическое руководство и координирует деятельность министерств и ведомств в области стандартизации и сертификации;

- утверждает государственные стандарты, разрабатывает и утверждает важнейшие стандарты и другие нормативно-технические документы по стандартизации межотраслевого значения;

- устанавливает единицы физических величин, допускаемые к применению в стране; разрабатывает, утверждает и хранит государственные эталоны физических величин.

Руководство работами по стандартизации, сертификации и их координацию Госстандарт Российской Федерации осуществляет непосредственно или через свои научно-исследовательские институты, территориальные органы, а также через отраслевые головные и базовые организации по стандартизации. В стране функционирует система органов и служб стандартизации, проводящих работы по стандартизации (в том числе и в областях радиотехники и метрологического обеспечения) на всех уровнях управления хозяйством. Система стандартизации построена по территориально-отраслевому принципу и включает:

государственные органы стандартизации и их службы; органы и службы стандартизации в отраслях народного хозяйства;

территориальные органы и службы стандартизации.

Основные положения, регламентирующие номенклатуру и структуру органов и служб стандартизации в стране, их компетенцию устанавливает ГОСТ Р «Государственная система стандартизации. Органы и службы стандартизации». Территориальные органы и службы стандартизации охватывают всю территорию страны и реализуют функции и права Госстандарта России на закрепленной за ними территории. Структура территориальных органов содержит:

- областные (территориальные) управления Госстандарта России;
- центры метрологии и стандартизации Госстандарта России (ЦМС);
- областные лаборатории государственного надзора за соблюдением стандартов и измерительной техникой Госстандарта России.

Центры метрологии и стандартизации несут ответственность за научно-методическое обеспечение развития стандартизации и метрологии, проводят научные исследования и осуществляют функции и права лабораторий государственного надзора Госстандарта России на закрепленных территориях.

Областные лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой отвечают за состояние и развитие стандартизации и метрологического обеспечения на предприятиях и в организациях, расположенных на территории области. Государственные стандарты Российской Федерации и изменения к ним подлежат государственной регистрации в порядке, установленном Госстандартом России. Информация о принятых межотраслевых и отраслевых стандартах, стандартах научно-технических и инженерных обществ представляется разработчиками стандартов в Госстандарт России. Обновление или отмену действующих государственных стандартов Российской Федерации осуществляют по ГОСТ Р 1.2–92.

Исключительное право издания и переиздания государственных стандартов Российской Федерации, стандартов и рекомендаций по стандартизации международных и региональных организаций, в которых Российскую Федерацию представляет Госстандарт России, принадлежит Госстандарту России.

Госстандарт Российской Федерации ежегодно издает указатели «Государственные стандарты РФ», содержащие перечни зарегистрированных в его органах государственных стандартов и технических условий, информацию об их изменениях, а также перечни иностранных и международных стандартов.

Обязанности всего информационного обеспечения в области стандартизации и метрологии возложены на органы и службы стандартизации Госстандарта России, министерств, ведомств и отраслей.

Государственный надзор за соблюдением стандартов

Государственный надзор (госнадзор) за соблюдением субъектами хозяйственной деятельности требований государственных стандартов на территории Российской Федерации организуют и осуществляют Госстандарт и специально уполномоченные органы управления в пределах их компетенции в

соответствии с законом РФ «О стандартизации». Основной задачей государственного надзора является необходимость систематически контролировать соблюдение стандартов и повсеместно содействовать предупреждению нарушений обязательных требований к объектам стандартизации.

Государственный надзор за стандартами и средствами измерений проводится в непроизводственных объединениях, промышленных предприятиях, в научно-исследовательских институтах и проектно-конструкторских организациях. Надзор охватывает все стадии цикла по выпуску продукции — проектирование, разработку, подготовку производства, изготовление, поставку, реализацию, эксплуатацию, хранение, ремонт и утилизацию, а также выполнение работ и оказание услуг. Распространяется надзор на все виды производимой продукции и призван контролировать деятельность предприятий по стандартизации, метрологии и управлению качеством.

Осуществляется государственный надзор как в форме выявления нарушений во внедрении и соблюдении требований стандартов, так и в форме контроля реализуемой продукции, в том числе проведения обязательных сертификационных испытаний. Надзор оказывает предприятиям помощь в разработке и осуществлении мероприятий по выпуску продукции соответствующего качества. При этом предусматривается комплексная проверка основного предприятия и организаций, изготавливающих сырье, полуфабрикаты и комплектующие изделия.

15.7. Основные вопросы стандартизации в радиоэлектронике

Анализ современного состояния мировой экономики позволяет сделать вывод, что мероприятия по стандартизации в радиоэлектронной промышленности Российской Федерации в ближайшие годы должны проводиться по ряду следующих направлений.

В области радиоизмерений:

- стандартизация параметров и методов измерений;
- унификация цифровых приборов для измерения основных параметров радиоаппаратуры в процессе ее регулирования, испытаний и контроля;
- стандартизация и унификация общих требований, методов расчета и испытаний на надежность, а также установление критериев оценки качества радиоаппаратуры при ее разработке, изготовлении, эксплуатации и хранении;
- разработка и внедрение виртуальных измерительных приборов на основе компьютерной техники.

В области радиовещания и телевидения:

- установление современных технических требований, методов испытаний, способов хранения и транспортировки, а также требований техники безопасности, повышение качества и надежности радиовещательных и телевизионных приемников, магнитофонов и т.д;

- разработка и внедрение научно обоснованных технических требований и единых технических показателей, обеспечивающих высококачественное изображение и надежность систем цветного телевидения, путем использования *телевидения высокой четкости (ТВЧ)* и цифровых систем обработки телевизионной информации.

В области электронной техники и микроэлектроники:

- разработка и введение в действие комплекса стандартов, регламентирующих общие технические требования, ряды параметров, методы измерения, габаритные и присоединительные размеры радиодеталей, радиокомпонентов и изделий микроэлектроники;

- внедрение технико-экономических и качественных показателей для массовых изделий электронной техники и микроэлектроники на уровне лучших мировых образцов;

- стандартизация комплекса технических требований к материалам, предназначенным для изготовления изделий электронной техники и микроэлектроники;

- стандартизация и унификация аппаратуры электронно-ионной, лазерной, плазменной и других видов современных технологий для различных производственных процессов.

В области средств связи:

- разработка и введение в действие единых стандартов на системы подвижной (мобильной) связи, радио- и телевизионного вещания (в том числе спутникового), аппаратуру вторичного уплотнения, телеграфные и фототелеграфные каналы, норм на тракты международной и междугородной сетей связи для повышения качества передачи всех видов информации;

- установление единых общих технических требований, методов испытаний, унификация узлов, деталей и блоков комплекса радиотелефонного, телефонного и телеграфного оборудования;

- внедрение наиболее рациональных параметрических и размерных рядов, типов, видов, марок аппаратуры, предназначенной для сетей радиотелефонной связи различных отраслей народного хозяйства;

- установление общих требований на аппаратуру и оборудование узлов связи проводной радиофикации городской и сельской сети для повышения качества радиовещания.

В области унификации узлов, блоков и приборов общего применения:

- разработка комплекса стандартов, регламентирующих требования, правила и нормы, предъявляемые к проектированию, испытанию, изготовлению и эксплуатации узлов, блоков и приборов общего применения на основе гибридных и интегральных микросхем;

- создание унифицированных параметрических и размерных рядов, узлов, блоков и приборов общего применения, в том числе вторичных источников питания радиоэлектронной аппаратуры.

15.8. Международное сотрудничество в сфере стандартизации

Сложившееся современное международное разделение труда и связанная с этим торговля и научно-техническое сотрудничество потребовали достижения международных соглашений и разработки международных нормативных документов, требования которых имели бы однозначное толкование как для изготовителя, так и для потребителя. Подобные документы должны содержать технические требования, методы и условия испытаний, точные определения величин, которые следует измерять, сведения о приборах, с помощью которых производятся измерения, данные о точности этих приборов и методах их поверки.

Международное сотрудничество в сфере стандартизации проводится по линии международных и региональных организаций по стандартизации, а также многосторонних и двусторонних связей между государствами на основании соответствующих указов Президента и постановлений правительства Российской Федерации.

В области международной стандартизации участвует несколько международных организаций, среди которых наиболее известны: Международная организация по стандартизации (ИСО, англ. — ISO); Международная электротехническая комиссия (МЭК); Европейская организация по контролю качества (ЕОКК); Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ); Международное бюро мер и весов (МБМВ) и ряд других. Международные стандарты и рекомендации этих организаций, формально не являясь обязательными нормативными документами, фактически соблюдаются всеми заинтересованными сторонами в той мере, в какой это им необходимо.

Наиболее представительной и известной из международных организаций, занимающихся стандартизацией, является *Международная организация по стандартизации*, в которую входят на настоящее время более 170 стран. Эта организация разрабатывает международные стандарты всех возможных видов: организационно-методические, технические требования, методы испытаний и т.д.

Стандарты Международной организации по стандартизации (международные стандарты ISO) обычно разрабатываются и вводятся в действие следующим образом. Специалистами ISO выбирается за основу наиболее прогрессивный, современный и действующий национальный стандарт одной из стран и в качестве первой редакции стандарта ISO переводится на английский, французский, немецкий и русский языки и рассылается для ознакомления и сбора отзывов всем членам технического комитета по данному направлению. После этого на основании отзывов разрабатывается вторая редакция и процесс повторяется. Затем на заседании технического комитета обсуждаются разногласия и вырабатывается единая редакция документа, которая ут-

верждается на основе консенсуса. Стандарты ISO носят рекомендательный характер, хотя часто применяются в международных и межгосударственных контрактах в качестве обязательных.

Из международных организаций по стандартизации, построенных по отраслевому принципу, наибольшую известность и влияние имеет МЭК, которая курирует все вопросы, связанные с электрической и электронной техникой. Организационная структура и принципы деятельности ее аналогичны ISO, часто они работают совместно и выпускают единые документы. Обозначения стандартов МЭК аналогичны ГОСТ, в случае выпуска совместного стандарта с ISO он имеет обозначение ISO/IEC.

В большинстве стран мира организация работ по стандартизации построена по похожим схемам. Отличие обычно заключается в степени централизации разработки стандартов и уровне участия в ней коммерческих и общественных организаций. Во многих странах мира требования регламентируются не для производимой, а для потребляемой продукции на территории данной страны.

Контрольные вопросы

1. Что собой представляет государственная система стандартизации?
2. Дайте определение понятию «стандартизация».
3. Дайте определение понятию «стандарта».
4. Каковы основные цели стандартизации?
5. Каковы основные задачи стандартизации?
6. Перечислите категории стандартов.
7. Перечислите виды стандартов.
8. Какие основные разделы должны содержать стандарты?
9. Перечислите основные принципы и методы стандартизации.
10. В чем заключается принцип предпочтительности?
11. Какие ряды предпочтительных чисел установлены стандартом Российской Федерации?
12. Какой ряд положен в основу предпочтительных чисел Российской Федерации?
13. На какие группы делятся общие нормы стандартизации?
14. Перечислите единые государственные системы стандартов.
15. Какие задачи выполняет Госстандарт Российской Федерации?
16. Как осуществляется государственный надзор за соблюдением стандартов?
17. В чем заключается международное сотрудничество в сфере стандартизации?
18. Перечислите основные международные организации в сфере стандартизации.
19. Какие основные вопросы стандартизации стоят в области радиоэлектроники?

Глава 16. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ

В истории Российской Федерации современный этап характеризуется переходом на рыночные отношения, внедрением экономических методов управления, повышением самостоятельности предприятий, активизацией участия в международном разделении труда и освоении рынков сбыта продукции. В этих условиях повышение качества продукции и услуг становится одной из важнейших экономических, политических, идеологических и нравственных задач нашей страны.

16.1. Общие сведения

Стандарты и технические условия, устанавливающие определенные требования на продукцию, заставляют изготовителя добиваться достижения необходимых потребительских свойств и качества продукции для обеспечения ее конкурентоспособности и сбыта. В условиях рыночной экономики, и изготовитель, и потребитель заинтересованы в официальном подтверждении высокого уровня качества продукции. Таким подтверждением служит сертификация продукции и услуг. Сертификация стала обязательной. Она рассматривается как официальное подтверждение качества и определяет конкурентоспособность продукции, а значит и развитие производства, его рентабельность и эффективность.

Установленные нормативные действия по подтверждению качества продукции или услуг и получили название «*сертификация*» (от франц. — *certificat* — документ, удостоверяющий качество изделия).

Как таковая, сертификация появилась очень давно. Ремесленники в древних городах каким-либо способом помечали свои изделия, чтобы удостоверить свое авторство. Таким подтверждением являлось, например, клеймо мастера на изделии. Свидетельством качества реализуемого товара часто выступало просто заявление мастера, если он имел высокую и безупречную репутацию среди покупателей.

Согласно рекомендациям ИСО «сертификация соответствия представляет собой действие, удостоверяющее посредством сертификата соответствия или знака соответствия, что изделие или услуга соответствует определенным

стандартам или другим нормативным документам». Это определение стало основой понятия сертификации соответствия, принятого сегодня в системе сертификации ГОСТ Р в Российской Федерации: *сертификация продукции* (далее — сертификация) — это деятельность по подтверждению соответствия продукции установленным требованиям. В настоящее время под сертификацией соответствия понимается действие третьей стороны, доказывающее, что обеспечивается необходимая уверенность в том, что должным образом идентифицированная продукция, процесс или услуга соответствует конкретному стандарту или другому нормативному документу.

В Российской Федерации сертификация продукции и услуг стала обязательной. Сертификация теперь рассматривается как официальное подтверждение качества и во многом определяет конкурентоспособность продукции, а значит и развитие производства, его эффективность и рентабельность.

16.2. Организационная база сертификации

Нормативная и техническая база для создания национальной системы сертификации сформировалась в Российской Федерации в начале 90-х годов XX в. Законодательно сертификация, как обязательная процедура защиты прав потребителя, была введена в действие в 1992 г. Законом Российской Федерации «О защите прав потребителя». С 1992 г. в России введена в действие система обязательной сертификации ГОСТ Р.

Законодательные основы работ по сертификации

Законодательная деятельность по сертификации в России обеспечивается и регулируется:

- законами Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг», «О защите прав потребителей», «Об обеспечении единства измерений», «О стандартизации», «О техническом регулировании»;
- подзаконными актами, направленными на решение отдельных социально-экономических задач и предусматривающими использование для этой цели обязательной сертификации;
- указами Президента и нормативными актами Правительства Российской Федерации.

Нормативная база сертификации содержит:

- совокупность нормативных документов, на соответствие требованиям которых проводится сертификация продукции и услуг, а также документов, устанавливающих методы проверки соблюдения этих требований;
- комплекс организационно-методических документов, определяющих правила и порядок проведения работ по сертификации.

Основополагающим документом Российской Федерации в области сертификации является Закон «О сертификации продукции и услуг». Данный

Закон устанавливает правовые основы обязательной и добровольной сертификации продукции, услуг и иных объектов (например, систем качества предприятий) в Российской Федерации, а также права, обязанности и ответственность участников сертификации. Он состоит из четырех разделов, объединяющих 20 статей. В силу важности Закона для дальнейшего изучения процессов сертификации приведем его положения и кратко их проанализируем.

Раздел I «Общие положения» включает в себя шесть статей

Статья 1. Понятие «сертификации». Это понятие содержит общее определение сертификации продукции и устанавливает цели проведения сертификации.

Сертификация осуществляется в целях:

- создания условий для деятельности предприятий, учреждений, организаций и предпринимателей на едином товарном рынке Российской Федерации, а также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле;
- содействия потребителям в компетентном выборе продукции;
- защиты потребителя от недобросовестности изготовителя (продавца, исполнителя);
- контроля безопасности продукции для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- подтверждения показателей качества продукции, заявленных изготовителем.

Сертификация может иметь обязательный и добровольный характер.

Статья 2. Законодательство Российской Федерации о сертификации. Отношения в области сертификации регулируются настоящим Законом и издаваемыми с ним актами законодательства Российской Федерации.

Статья 3. Международные договоры. Если международным договором Российской Федерации установлены иные правила, чем те, которые содержатся в законодательстве Российской Федерации о сертификации, то применяются правила международного договора.

Статья 4. Полномочия Госстандарта России. Госстандарт России в соответствии с настоящим Законом:

- формирует и реализует государственную политику в области сертификации, устанавливает общие правила и рекомендации по проведению сертификации на территории Российской Федерации и публикует официальную информацию о них;
- проводит государственную регистрацию систем сертификации и знаков соответствия, действующих в Российской Федерации;
- публикует официальную информацию о действующих в Российской Федерации системах сертификации и знаках соответствия и представляет ее в установленном порядке в международные (региональные) организации по сертификации;

— готовит в установленном порядке предложения о присоединении к международным (региональным) системам сертификации, а также может в установленном порядке заключать соглашения с международными (региональными) организациями о взаимном признании результатов сертификации;

— представляет в установленном порядке Российскую Федерацию в международных (региональных) организациях по вопросам сертификации как национальный орган Российской Федерации по сертификации.

Статья 5. Система сертификации. Эта статья определяет понятие и требования к созданию и регистрации систем сертификации в России.

1. Система сертификации создается государственными органами управления, предприятиями, учреждениями и организациями и представляет собой совокупность участников сертификации, осуществляющих сертификацию по правилам, установленным в этой системе в соответствии с настоящим Законом. В систему сертификации могут входить предприятия, учреждения и организации независимо от форм собственности, а также общественные объединения. В систему сертификации могут входить несколько систем сертификации однородной продукции.

2. Системы сертификации подлежат государственной регистрации в установленном Госстандартом России порядке.

Статья 6. Сертификат и знак соответствия

1. *Сертификат соответствия* (далее — сертификат) — документ, выданный по правилам системы сертификации для подтверждения соответствия сертифицированной продукции установленным требованиям. Обязательной составной частью сертификата соответствия является сертификат пожарной безопасности. Порядок организации и проведения сертификации продукции и услуг в области пожарной безопасности определяется Государственной противопожарной службой Министерства внутренних дел Российской Федерации по согласованию с федеральным органом исполнительной власти в области стандартизации, метрологии и сертификации.

2. *Знак соответствия* — зарегистрированный в установленном порядке знак, которым по правилам, установленным в данной системе сертификации, подтверждается соответствие маркированной им продукции установленным требованиям. Порядок государственной регистрации знаков соответствия устанавливается Госстандартом России.

3. Правила применения знаков соответствия устанавливаются конкретной системой сертификации в соответствии с правилами, устанавливаемыми Госстандартом России.

Раздел II «Обязательная сертификация» состоит из 10 статей

Статья 7. Обязательная сертификация

1. Обязательная сертификация осуществляется в случаях, предусмотренных законодательными актами Российской Федерации.

2. Организация и проведение работ по обязательной сертификации возлагаются на Госстандарт России, а в случаях, предусмотренных законодательными актами Российской Федерации в отношении отдельных видов продукции, могут быть возложены на другие государственные органы управления Российской Федерации.

3. Формы обязательной сертификации продукции устанавливаются Госстандартом России либо другими государственными органами управления Российской Федерации, уполномоченными на то в соответствии с настоящей статьей, с учетом сложившейся международной и зарубежной практики.

4. Запрещается рекламировать продукцию, подлежащую обязательной сертификации, но не имеющую сертификата соответствия.

Статья 8. Участники обязательной сертификации. Участниками обязательной сертификации являются Госстандарт России, иные государственные органы управления Российской Федерации, уполномоченные проводить работы по обязательной сертификации, органы по сертификации, испытательные лаборатории (центры), изготовители (продавцы, исполнители) продукции, а также центральные органы систем сертификации, определяемые в необходимых случаях для организации и координации работ в системах сертификации однородной продукции. Допускается участие в проведении работ по обязательной сертификации зарегистрированных некоммерческих (бесприбыльных) объединений (союзов) и организаций любых форм собственности при условии их аккредитации соответствующим государственным органом управления.

Статья 9. Правомочия государственных органов управления. Этим органом является Госстандарт. Госстандарт России и другие государственные органы управления Российской Федерации, на которые законодательными актами Российской Федерации возлагаются организация и проведение работ по обязательной сертификации в пределах своей компетенции:

- создают системы сертификации однородной продукции и устанавливают правила процедуры и управления для проведения сертификации в этих системах;
- осуществляют выбор способа подтверждения соответствия продукции требованиям нормативных документов (формы сертификации);
- определяют центральные органы систем сертификации;
- аккредитуют органы по сертификации и испытательные лаборатории (центры) и выдают им разрешения на право проведения определенных видов работ (лицензии на проведение определенных видов работ);
- ведут государственный реестр участников и объектов сертификации;
- устанавливают правила признания зарубежных сертификатов, знаков соответствия и результатов испытаний;
- устанавливают правила аккредитации и выдачи лицензий на проведение работ по обязательной сертификации;

- осуществляют государственный контроль и надзор и устанавливают порядок инспекционного контроля за соблюдением правил сертификации за сертифицированной продукцией;

- рассматривают апелляции по вопросам сертификации;
- выдают сертификаты и лицензии на применение знака соответствия.

Статья 10. Обязанности центрального органа системы сертификации. Центральным является орган, возглавляющий систему сертификации. Центральный орган системы сертификации:

- организует, координирует работу и устанавливает правила процедуры и управления в возглавляемой им системе сертификации;
- рассматривает апелляции заявителей по поводу действий органов по сертификации, испытательных лабораторий (центров).

Статья 11. Обязанности органа по сертификации. Орган по сертификации:

- сертифицирует продукцию, выдает сертификаты и лицензии на применение знака соответствия;
- проводит идентификацию продукции, предоставленной для сертификации, в соответствии с правилами системы сертификации;
- приостанавливает либо отменяет действие выданных им сертификатов;
- осуществляет в установленном порядке инспекционный контроль за сертифицированной продукцией;
- предоставляет заявителю по его требованию необходимую информацию в пределах своей компетенции.

Орган по сертификации и его сотрудники несут юридическую ответственность за нарушение правил сертификации.

Статья 12. Обязанности испытательной лаборатории (центра). Испытательные лаборатории (центры), аккредитованные в установленном соответствующей системой сертификации порядке, осуществляют испытания конкретной продукции или конкретные виды испытаний и выдают протоколы испытаний для целей сертификации.

Испытательные лаборатории (центры) являются участниками систем сертификации продукции или конкретных видов испытаний. Выданные этими лабораториями протоколы испытаний служат объективной основой для выдачи сертификата соответствия или отказа в этом органе по сертификации. Порядок работы испытательных лабораторий и требования к ним устанавливаются соответствующими нормативными документами системы сертификации. Лаборатория и ее сотрудники несут ответственность за нарушение правил сертификации.

Статья 13. Обязанности изготовителей (продавцов, исполнителей). Изготовители (продавцы, исполнители) продукции, подлежащей обязательной сертификации и реализуемой на территории Российской Федерации, обязаны:

- реализовывать эту продукцию только при наличии сертификата, выданного или признанного уполномоченным на то органом;

- обеспечивать соответствие реализуемой продукции требованиям нормативных документов, на соответствие которым она была сертифицирована, и маркирование ее знаком соответствия в установленном порядке;
- указывать в сопроводительной технической документации сведения о сертификации и нормативных документах, которым должна соответствовать продукция, и обеспечивать доведение этой информации до потребителя (покупателя, заказчика);
- приостанавливать или прекращать реализацию сертифицированной продукции, если она не отвечает требованиям нормативных документов, на соответствие которым сертифицирована, по истечении срока действия сертификата или в случае, если действие сертификата приостановлено либо отменено решением органа по сертификации;
- обеспечивать беспрепятственное выполнение своих полномочий должностными лицами органов, осуществляющих обязательную сертификацию продукции и контроль за сертифицированной продукцией;
- извещать орган по сертификации в установленном им порядке об изменениях, внесенных в техническую документацию или в технологический процесс производства сертифицированной продукции.

Согласно Закону Российской Федерации «О защите прав потребителей» и другим актам законодательства наличие сертификата обязательно для продукции, реализуемой на территории Российской Федерации, в том числе импортной. Требования к экспортируемой продукции определяется заказчиком (покупателем).

Статья 14. Условия ввоза импортируемой продукции. Статья устанавливает требования к сертификации продукции, ввозимой на территорию РФ.

1. В условиях контрактов (договоров), заключаемых на поставку в Российскую Федерацию продукции, подлежащей в соответствии с актами законодательства Российской Федерации обязательной сертификации, должно быть предусмотрено наличие сертификата и знака соответствия, подтверждающих ее соответствие установленным требованиям. Указанные сертификаты и знаки соответствия должны быть выданы или признаны уполномоченным на то органом Российской Федерации.

2. Сертификаты или свидетельства об их признании представляются в таможенные органы вместе с грузовой таможенной декларацией и являются необходимыми документами для получения разрешения на ввоз продукции на территорию Российской Федерации.

3. Порядок ввоза на территорию Российской Федерации продукции, подлежащей обязательной сертификации, устанавливается Государственным таможенным комитетом Российской Федерации и Госстандартом России в соответствии с законодательными актами Российской Федерации.

Эта статья запрещает реализацию импортной продукции, подлежащей обязательной сертификации, без сертификата, выданного и признанного в установленном

ном порядке. Для облегчения импортерам товаров пересечения таможенной границы установлена обязанность предусматривать в контрактах на поставку наличие сертификата и маркировку продукции знаком соответствия, подтверждающих ее соответствие требованиям безопасности, действующим в Российской Федерации.

Статья 15. *Государственный контроль и надзор за соблюдением правил обязательной сертификации и за сертифицированной продукцией.* Статья состоит из двух пунктов.

1. Государственный контроль и надзор за соблюдением изготовителями (продавцами, исполнителями), испытательными лабораториями (центрами), органами по сертификации правил обязательной сертификации и за сертифицированной продукцией осуществляется Госстандартом России, иными специально уполномоченными государственными органами управления Российской Федерации в пределах их компетенции.

2. Непосредственно государственный контроль и надзор за соблюдением правил сертификации и сертифицированной продукцией проводится должностными лицами, осуществляющими государственный контроль и надзор за соблюдением обязательных требований государственных стандартов. Указанные должностные лица осуществляют государственный контроль и надзор за соблюдением правил по сертификации и за сертифицированной продукцией в порядке и на условиях, установленных Законом Российской Федерации «О стандартизации».

Согласно Закону РФ «О стандартизации» должностные лица, от имени Госстандарта России непосредственно контролирующие и надзирающие за соблюдением правил сертификации и сертифицированной продукцией, имеют специальное наименование — государственный инспектор.

Статья 16. *Финансирование работ по сертификации и государственному контролю и надзору.*

1. Обязательному государственному финансированию подлежат:

- разработка прогнозов развития сертификации, правил и рекомендаций по ее проведению; обеспечение официальной информацией в области сертификации;
- участие в работе международных (региональных) организаций по сертификации и проведение работ с зарубежными национальными органами по сертификации;
- разработка и (или) участие в разработке международных (региональных) правил и рекомендаций по сертификации;
- разработка проектов актов законодательства в области сертификации;
- проведение научно-исследовательских и иных работ по сертификации, имеющих общегосударственное значение;
- проведение государственного контроля и надзора за соблюдением правил сертификации и за сертифицированной продукцией;

- ведение Государственного реестра по сертификации и аккредитации и архивное хранение материалов по государственной регистрации систем сертификации и знаков соответствия;
- другие работы по обязательной сертификации, определяемые законодательством Российской Федерации.

2. Оплата работ по обязательной сертификации конкретной продукции производится заявителем в порядке, установленном Госстандартом России и государственными органами управления Российской Федерации, на которые законодательными актами Российской Федерации возложены организация и проведение обязательной сертификации, по согласованию с Министерством финансов Российской Федерации. Сумма средств, израсходованных заявителем на проведение обязательной сертификации своей продукции, относится на ее себестоимость.

В соответствии с налоговым законодательством указанные средства исключаются из сумм, подлежащих налогообложению.

Раздел III «Добровольная сертификация» содержит 3 статьи

Статья 17. Добровольная сертификация. По продукции и услугам, не подлежащим в соответствии с законодательными актами Российской Федерации обязательной сертификации, и по требованиям, на соответствие которым законодательными актами Российской Федерации не предусмотрено проведение обязательной сертификации, по инициативе заявителей (изготовителей, продавцов, исполнителей) может проводиться добровольная сертификация в целях подтверждения их соответствия требованиям стандартов, технических условий, рецептур и других документов.

Добровольная сертификация проводится на условиях договора между заявителем и органом по сертификации.

Статья 18. Организация добровольной сертификации. В статье отмечается, что добровольная сертификация осуществляется органами по сертификации, входящими в систему добровольной сертификации, образованную любым юридическим лицом, зарегистрировавшим в установленном порядке данную систему и знак соответствия в специально уполномоченном федеральном органе исполнительной власти в области сертификации. Органом по добровольной сертификации может быть юридическое лицо, образовавшее систему добровольной сертификации или взявшее на себя функцию органа по добровольной сертификации на условиях договора с юридическим лицом, образовавшим данную систему.

Орган по добровольной сертификации осуществляет сертификацию продукции, выдает сертификаты, а также на условиях договора с заявителем предоставляет ему право на применение знака соответствия либо приостанавливает или отменяет действие выданных сертификатов.

Системы сертификации, имеющие статус добровольных, основываются на их авторитете. Не являясь обязательными, они оказывают, тем не менее, за-

метное влияние на качество продукции, вызывают доверие потребителя к изготовителю (или поставщику), повышают конкурентоспособность продукции.

Статья 19. Права заявителя. При заключении договора на проведение сертификации заявитель вправе получить от органа по добровольной сертификации необходимую информацию о правилах сертификации продукции, а также определить форму сертификации.

Раздел IV. «Ответственность за нарушение положений настоящего Закона» состоит из одной статьи.

Статья 20. Уголовная, административная либо гражданско-правовая ответственность. Юридические и физические лица, а также органы государственного управления, виновные в нарушении правил обязательной сертификации, несут в соответствии с действующим законодательством уголовную, административную либо гражданско-правовую ответственность.

Деятельность по сертификации в РФ регулируется также законами РФ «Об обеспечении единства измерений» и «О стандартизации». В первом из них устанавливаются требования к организации и проведению измерений, испытаний и контроля, которые составляют объективную основу оценки соответствия продукции при сертификации. Во втором введены общегосударственные требования к назначению, применению и соблюдению стандартов и нормативных документов, в том числе к тем, на соответствие которым проводится сертификация.

16.3. Объекты сертификации

Во II и III разделах закона «О сертификации продукции и услуг» отмечалось, что сертификация делится на обязательную и добровольную.

Обязательная сертификация распространяется на продукцию и услуги, связанные с обеспечением безопасности окружающей среды, жизни, здоровья и имущества. Нормативные требования на продукцию и услуги должны выполняться всеми производителями на внутреннем рынке и импортерами при ввозе товаров на территорию России. Номенклатура товаров и услуг, подлежащих обязательной сертификации, определяется Госстандартом России в соответствии с законом «О защите прав потребителей». Работы по обязательной сертификации осуществляются органами по сертификации и испытательными лабораториями (центрами), аккредитованными в установленном порядке системами обязательной сертификации. Область распространения обязательной сертификации схематично можно представить следующим образом.

Продукция: товары машиностроительного комплекса; товары электронной, электротехнической и приборостроительной промышленности; медицинская техника и медицинская продукция; товары легкой промышленности, сельскохозяйственного производства и пищевой продукции; товары сырье-

вых отраслей и деревообрабатывающей промышленности; средства защиты органов дыхания и спецзащиты; ветеринарные биологические препараты; изделия пиротехники; тара.

Услуги: торговли и общественного питания; бытовые; пассажирского транспорта и связи; туристические и экскурсионные; прочие.

Добровольная сертификация продукции и услуг проводится в тех случаях, когда стандарты или нормы не касаются требований безопасности и носят добровольный характер для товаропроизводителя. Необходимость добровольной сертификации появляется, когда несоответствие стандартам или другим нормативам на объекты сертификации не отвечает экономическим интересам отраслей индустрии, крупных финансово-промышленных групп и сферы услуг.

Добровольной сертификации может быть подвергнута продукция, на которую отсутствуют обязательные к выполнению требования по безопасности. В то же время ее проведение ограничивает доступ на рынок некачественных изделий за счет проверки таких показателей, как надежность, экономичность, эстетичность и пр. Законодательно добровольная сертификация не заменяет обязательную, ее результаты не являются основанием для запрета (поставки) продукции и в основном направлена на привлечение клиента. Это в полной мере относится и к добровольной сертификации услуг.

В последние годы стала широко внедряться добровольная сертификация систем качества предприятий на соответствие требованиям международных стандартов. На их основе в России также были разработаны стандарты систем качества. Эти стандарты предусматривают наличие элементов, обеспечивающих функционирование системы качества на предприятии. В Государственном реестре Российской Федерации была зарегистрирована система сертификации систем качества и производств, названная кратко «реестром систем качества». Регистр представляет собой систему сертификации, построенную в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации, правилами по сертификации, государственными стандартами, а также международными и европейскими правилами и процедурами. Согласно этой системы проводится: сертификация систем качества и производств; инспекционный контроль за сертифицированными системами качества и производствами; международное сотрудничество в области сертификации систем качества для взаимного признания ее результатов.

Для организационно-практической деятельности по сертификации систем качества Госстандарт ввел блок из четырех государственных стандартов, ставших нормативно-методической основой регистра систем качества: ГОСТ Р 40.002–96 «Система сертификации. Регистр систем качества. Основные положения»; ГОСТ Р 40.003–96 «Система сертификации. Регистр систем качества»; ГОСТ 40.004–96 «Система сертификации. Регистр систем качества. Порядок проведения сертификации производств» и ГОСТ 40.005–96 «Система

ма сертификации. Регистр систем качества. Инспекционный контроль за сертифицированными системами качества и производствами».

Положения ГОСТ Р 40.002–96 обязательны для всех организаций, пожелавших сертифицировать систему качества в регистре и он применяется при обязательной и добровольной сертификации в системе сертификации. Стандарт устанавливает, что при сертификации должны быть обеспечены: добровольность; бездискриминационный доступ к участию в процессах сертификации; объективность оценок; воспроизводимость результатов оценок; конфиденциальность; информативность; специализация органов по сертификации систем качества (производств); проверка выполнения требований, предъявляемых к продукции (услуге) в законодательно регулируемой сфере; достоверность доказательств со стороны заявителя соответствия системы качества нормативным требованиям.

ГОСТ Р 40.003–96 устанавливает процедуры: взаимодействия органов по сертификации систем качества и заявителей в предсертификационный период; проведения проверок; принятия решений о сертификации систем качества; оформления сертификатов соответствия системы качества и инспекционного контроля за сертифицированными системами качества.

Основные аспекты ГОСТ Р 40.004–96 устанавливает процедуры сертификации производств, аналогичные процедурам сертификации систем качества.

ГОСТ Р 40.006–96 устанавливает процедуры: проведения инспекционного контроля сертифицированных систем качества; взаимодействия органов по сертификации систем качества и заявителей при проведении инспекционного контроля; проведения инспекционного контроля и принятия решений по его результатам, а также взаимодействия органов по сертификации с Техническим центром регистра систем качества.

Системы сертификации

Проведение сертификации возможно только в рамках определенной системы сертификации, которая должна быть признана всеми ее участниками и зарегистрирована в установленном порядке. В зависимости от объема и содержания сертификационных работ возможны несколько вариантов систем сертификации. В каждом из вариантов предусмотрено выполнение определенных аттестационных и контрольных функций, при положительных результатах которых может быть выдан соответствующий сертификат качества. Система сертификации создается государственными органами управления, предприятиями, учреждениями и организациями. Регистрацию систем сертификации в Российской Федерации осуществляет Госстандарт.

Согласно ГОСТ Р. 40.001–95 «Правила по проведению сертификации в Российской Федерации» система сертификации — совокупность участников сертификации, осуществляющих сертификацию по правилам, установленным в этой системе. В систему сертификации могут входить предприятия,

учреждения и организации независимо от форм собственности, а также общественные объединения.

Применяемая в настоящее время нормативная база включает несколько вариантов систем сертификации, которые отличаются объемом и содержанием сертификационных работ. Во всех вариантах предусмотрено выполнение определенных аттестационных и контрольных функций, при положительных результатах которых сертифицируемой продукции может быть выдан соответствующий сертификат качества.

Главной целью систем обязательной сертификации является защита потребителей от приобретения или использования товаров, работ и услуг, которые опасны для их жизни, здоровья и имущества, а также для окружающей среды. Кроме того системы обязательной и добровольной сертификации создаются для целей улучшения качества продукции и услуг, повышения конкурентоспособности на внутреннем рынке и содействия экспорту.

Методологической основой построения подавляющего большинства систем сертификации являются нормативные документы ИСО, МЭК, Системы сертификатов МОЗМ и Системы сертификации ГОСТ Р. Типовая структура системы сертификации Российской Федерации включает: национальный орган по сертификации; центральный орган по сертификации; орган по сертификации; испытательную лабораторию и заявителей сертификации.

Национальный орган по сертификации — Госстандарт России осуществляет свою деятельность по сертификации на основе законодательства Российской Федерации.

Центральный орган по сертификации действует в соответствии с законом Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг» и правилами Госстандарта России; на основе правил организует разработку систем (правил, порядков) сертификации однородной продукции.

Орган по сертификации — орган, проводящий сертификацию соответствия. Он создается на базе организаций, имеющих статус юридического лица и являющихся третьей стороной, т. е. независимым от производителя и потребителя.

Испытательная лаборатория осуществляет испытания конкретной продукции или конкретные виды испытаний и выдает протоколы испытаний для целей сертификации. Основные требования, предъявляемые к испытательным лабораториям: независимость, беспристрастность, неприкосновенность и техническая компетентность.

Заявители сертификации — это изготовители, продавцы и потребители.

Основными функциями органов сертификации являются: разработка правил и порядка проведения сертификации; аттестация и аккредитование испытательных лабораторий; допуск предприятий и других и изготовителей к сертификации; выдача сертификатов соответствия или лицензий; рассмотрение споров о качестве сертификационной продукции.

Система сертификации должна обеспечивать свободный доступ изготовителям, потребителям, общественным организациям, органам по сертификации, испытательным лабораториям, а также всем другим заинтересованным предприятиям, организациям и отдельным лицам к информации о ее деятельности, в том числе о правилах, участниках, результатах аккредитации и сертификации. Также должна обеспечиваться конфиденциальность информации, составляющей коммерческую тайну.

В любой системе сертификации процесс сертификации проводится по установленным схемам. *Схема сертификации* — состав и последовательность действий третьей стороны при оценке соответствия продукции, услуг и систем качества. Обычно система сертификации может отражаться несколькими схемами. При выборе схемы необходимо учитывать особенности производства, испытаний, поставки и использования конкретной продукции, требуемый уровень доказательности, возможные затраты заявителя. Схема сертификации должна обеспечивать необходимую доказательность системы сертификации. Для этого рекомендуется использовать общепризнанные схемы, в том числе и международные.

16.4. Сертификация средств измерений

В последние годы во многих развитых странах и в том числе в Российской Федерации к средствам измерений, применяемым в сферах *государственного метрологического контроля и надзора* (ГМКиН), стали предъявляться специфические законодательные требования. Поэтому испытания средств измерений, проводимые для утверждения типа, а также их поверка являются традиционными видами деятельности государственных метрологических служб.

В Российской Федерации *Система испытаний и утверждения типа* средств измерений действует в соответствии с Законом «Об обеспечении единства измерений» и направлена на обеспечение выполнения метрологических норм и правил им предусмотренных. Кроме того, на средства измерений распространяются действия Закона Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг». Система сертификации средств измерений начала функционировать с момента ее регистрации, так как она была практически подготовлена организационно, методически, нормативно и экспериментально и ясны перспективы ее развития.

Сертификация средств измерений в Российской Федерации осуществляется согласно *Системе сертификации средств измерений*, которая предусматривает:

- добровольную сертификацию средств измерений на соответствие метрологическим нормам и правилам;

- разработку и ведение нормативных документов, устанавливающих метрологические нормы и правила на средства измерений;
- разработку и ведение типовых программ испытаний для сертификации средств измерений;
- апробирование и утверждение в процессе сертификации методик калибровки средств измерений, а также подготовку предложений по межкалибровочным интервалам;
- аттестацию методик выполнения измерений с помощью сертифицированных средств измерений;
- создание разветвленной сети аккредитованных по видам измерений органов по сертификации средств измерений и испытательных лабораторий (центров) конкретных групп средств измерений;
- сотрудничество с национальными метрологическими службами стран по взаимному признанию аккредитации органов, лабораторий (центров), сертификатов соответствия, знаков соответствия, а также результатов сертификации средств измерений.

Так как ряд групп средств измерений, применяемых в сферах ГМКиН, включены в Перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации, актуальной становится проблема взаимоувязки работ по метрологии и сертификации. Сейчас в рамках Системы испытаний и утверждения типа стала обязательной проверка в предусмотренных Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» специализированных Государственных центрах испытаний всех характеристик и технических требований на испытываемые средства измерений.

Сертификацию средств измерений только на соответствие метрологическим нормам и правилам выполняют в рамках добровольной Системы сертификации средств измерений, зарегистрированной Госстандартом Российской Федерации в соответствии с Законом РФ «О сертификации продукции и услуг». Испытания с целью сертификации средств измерений, изготовленных разработчиком и подлежащих применению в сферах ГМКиН, совмещают с испытаниями на соответствие средств измерений утвержденному типу.

Согласно нормативным документам сертификацию средств измерений осуществляют аккредитованные органы по сертификации средств измерений по результатам испытаний, проведенных аккредитованными испытательными лабораториями (центрами) как самостоятельными, так и входящими в состав органов по сертификации. Орган по сертификации выдает сертификат соответствия на средства измерений, подлежащие применению в сфере ГМКиН, только при положительных результатах испытаний на соответствие утвержденному типу.

Любой вид сертификации базируются на высокой компетенции специалистов, которые реализуют ее процедуры и разрабатывают законодательные и нормативно-

методические документы, а также готовят техническую базу. Опыт ведения работ по сертификации в Российской Федерации показал, что имеется острая необходимость в подготовке специалистов по вопросам стандартизации и сертификации. Причем не только для органов по сертификации и испытательных лабораторий, но и для предприятий промышленности и сферы услуг, т.е. для тех, кто работает на стадии обеспечения соответствующего уровня качества и готовит к сертификации результаты своего труда.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение сертификации.
2. Когда в Российской Федерации введена в действие система обязательной сертификации ГОСТ Р?
3. Объясните структуру законодательной и нормативной базы сертификации Российской Федерации.
4. Что может являться объектом сертификации?
5. Дайте определение сертификата соответствия.
6. Что такое знак соответствия?
7. Назовите основные статьи закона Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг».
8. Объясните основные задачи Госстандарта Российской Федерации в области сертификации.
9. Что такое система сертификации?
10. Почему сертификация разделена на обязательную и добровольную?
11. Перечислите основных участников системы сертификации.
12. В чем заключаются обязанности органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров)?
13. В чем заключаются задачи центрального органа по сертификации в системе сертификации?
14. Дайте определение схемы сертификации.
15. Для каких целей применяется сертификация средств измерений?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перевернув последнюю страницу, подведем некоторые итоги, чтобы оценить изученное и наметить пути дальнейшей работы.

Сейчас в любой области науки, техники и производства невозможно обойтись без точных измерений. Поэтому эта проблема была и будет актуальна. Ключевые вопросы метрологии и практики измерений на современном уровне изложены в учебнике. Главная цель настоящего учебника — проанализировать основы теории и практики измерений и попытаться не только сообщить необходимые элементарные сведения, но и развить у студентов интуицию в отношении как метрологических аспектов, так и измерений.

Как современная дисциплина, курс «Метрология и радиоизмерения» насыщен терминами, понятиями и методами из разных научно-технических областей: математики, физики, теории электрических цепей, радиотехники, микроэлектроники и вычислительной техники. Студентам следует четко представлять, что в данном курсе все эти термины, понятия и методы создают взаимосвязанное образование и должны рассматриваться как единое целое.

Авторы учебника ни в коей мере не задавались целью дать исчерпывающие ответы на все вопросы теории и практики измерений. К сожалению, ограниченный объем учебника не позволил в должной мере рассмотреть ряд тем. Степень их важности различна. Среди них особое внимание заслуживали бы вопросы, связанные со статистическим анализом измеряемых параметров, а также информационно-измерительные и интеллектуальные системы и виртуальные приборы. Однако авторы надеются, что студенты и внимательные читатели, освоив материалы данного учебника, смогут, используя новейшую литературу, самостоятельно изучить интересующие их вопросы.

К таким вопросам следует отнести: калибровку измерительных приборов через Internet — например, дистанционная калибровка или поверка с прямым доступом; создание всемирной сети для метрологического сотрудничества между метрологическими организациями разных стран; измерения в виртуальных компаниях — в частности, телеметрические измерения и контроль; измерения в компьютерных сетях; измерения в интерактивном режиме и т.д.

Думаю, что было бы весьма полезным в рамках данного творческого коллектива подготовить и издать более объемный учебник, который позволил бы на ранней стадии обучения привить студентам основы метрологической культуры.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Список основных государственных стандартов и нормативных документов в области метрологии и радионизмерений

Законы Российской Федерации

1. Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений»
2. Закон Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг»
3. Закон Российской Федерации «О защите прав потребителей»
4. Закон Российской Федерации «О стандартизации»
5. Закон Российской Федерации «О техническом регулировании»

Международные стандарты

1. Стандарт ИСО 9000-9004. Модели систем качества. Принципы организаций, структура и документация систем качества
2. Стандарт ДИН ЕН ИСО 17025: 2000 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»
3. Стандарт МК (ИСО/ИНФКО МКС)001-96. Межгосударственный классификатор стандартов
4. Стандарт ИСО/МЭК 2 «Общие термины и определения в области стандартизации и смежных видов деятельности»
5. Стандарт ДИН ЕН ИСО 17025: 2000. «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»

Правила по межгосударственной стандартизации

1. ПМГ 29-99. «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения»
2. ПМГ 51-2002. «ГСИ. Документы на методики поверки средств измерений. Основные положения»
3. ПМГ 06-2001. «ГСИ. Правила. Порядок признания результатов испытаний и утверждения типа, поверки, метрологической аттестации средств измерений»
4. ПМГ 44-2001. «ГСИ. Порядок признания методик выполнения измерений»
5. ПМГ 42-2001. «ГСИ. Сличение государственных (национальных) эталонов. Порядок организации и проведения»
6. ПМГ 07-2001. «ГСИ. Порядок признания результатов поверки средств измерений»
7. ПМГ 02-93. «ГСИ. Типовое положение о межгосударственном техническом комитете по стандартизации»

8. ПМГ 08-94. «ГСИ. Порядок взаимного признания аккредитации лабораторий, осуществляющих испытания, поверку или калибровку средств измерений»
9. ПМГ 03-99. «ГСИ. Порядок регистрации и издания межгосударственных нормативных документов по стандартизации»
10. ПМГ 18-96. «ГСИ. Межгосударственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты»
11. ПМГ 16-96. «ГСИ. Положение о межгосударственном стандартном образце»
12. ПМГ 04-94. «ГСИ. Порядок распространения межгосударственных стандартов и нормативной документации Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации»
13. ПМГ 13-95. «ГСИ. Порядок разработки и ведения межгосударственных классификаторов»
14. ПМГ 22-97. «ГСИ. Правила по программному планированию разработки межгосударственных стандартов»
15. ПМГ 24-97. «ГСИ. Рекомендации по разработке стандартов межгосударственными техническими комитетами по стандартизации»
16. ПМГ 25-98. «ГСИ. Сборник национальных перечней продукции и услуг, подлежащих обязательной сертификации. Порядок оформления и ведения»
17. ПМГ 26-98. «ГСИ. Реестр межгосударственных стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов»

Государственные стандарты Российской Федерации

1. ГОСТ Р 8.000—2000. «ГСИ. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения»
2. ГОСТ Р 1.0-92. «ГСИ. Государственная система стандартизации Российской Федерации. Основные положения»
3. ГОСТ Р 1.2-92. «ГСИ. Порядок разработки государственных стандартов»
4. ГОСТ Р 1.2-97. «ГСИ. Правила проведения работ по межгосударственной стандартизации. Порядок разработки, принятия, применения, обновления и отмены документов по межгосударственной стандартизации»
5. ГОСТ Р 1.3-92. «ГСИ. Государственная система стандартизации Российской Федерации. Порядок согласования, утверждения и регистрации технических условий»
6. ГОСТ Р 1.4-92. «ГСИ. Стандарты отраслей, стандарты предприятий, стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений»
7. ГОСТ Р 1.4-93. «ГСИ. Стандарты отраслей, стандарты предприятий, стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений. Общие положения»
8. ГОСТ 1.5-2001. «ГСИ. Правила проведения работ по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию стандартов»
9. ГОСТ Р 1.8-95. «ГСИ. Порядок разработки и применения межгосударственных стандартов»
10. ГОСТ Р 1.10-95. «ГСИ. Порядок разработки, принятия, регистрации правил и рекомендаций по стандартизации, метрологии, сертификации, аккредитации, каталогизации и информации о них»

11. ГОСТ Р 1.11-99. «ГСИ. Метрологическая экспертиза проектов государственных стандартов»
12. ГОСТ Р 1.12-99. «ГСИ. Стандартизация и смежные виды деятельности. Термины и определения»
13. ГОСТ Р 40.001-95. «ГСИ. Правила по проведению сертификации систем качества в Российской Федерации»
14. ГОСТ Р 40.002-2000 «ГСИ. Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Основные положения»
15. ГОСТ Р 40.003-96 «ГСИ. Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Порядок проведения сертификации систем качества»
16. ГОСТ Р 40.004-96 «Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Порядок проведения сертификации производств»
17. ГОСТ Р 40.005-96 «Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Инспекционный контроль за сертифицированными системами качества и производствами»
18. ГОСТ Р 50.3.004-99. «ГСИ. Система сертификации ГОСТ Р. Анализ состояния производства при сертификации продукции»
19. ГОСТ Р 40.101-95 Государственная регистрация систем добровольной сертификации и их знаков соответствия
20. ГОСТ Р 9001-96. «ГСИ. Системы качества. Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании»
21. ГОСТ Р 9002-96. «ГСИ. Системы качества. Модель обеспечения качества при производстве, монтаже и обслуживании»
22. ГОСТ 8.310-90. «ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения»
23. ГОСТ Р 8.315-97. «ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения»
24. ГОСТ Р 51000.3-96. «ГСИ. Общие требования к испытательным лабораториям»
25. ГОСТ Р 8.563-96 «ГСИ. Методики выполнения измерений»
26. ГОСТ Р 8.567-99 «ГСИ. Измерения времени и частоты. Термины и определения»
27. ГОСТ Р 28.596-90 (МЭК 196-65) «ГСИ. Стандарты частоты»
28. ГОСТ Р 29.322-92 (МЭК 38-83) «ГСИ. Стандарты напряжения»
29. ГОСТ Р 8.568-97 «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования»
30. ГОСТ 8.129-99. «ГСИ. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты. Рекомендации по метрологии»
31. ГОСТ Р 8.027-2001. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы»
32. ГОСТ Р 8.022-91 «ГСИ. Государственный первичный эталон и поверочная схема для средств измерений силы постоянного тока в диапазоне $10^{-16} \dots 30$ А»
33. ГОСТ Р 8.110-97. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник»
34. ГОСТ Р 8.564-98. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений электрической емкости в диапазоне частот от 1 до 100 МГц»
35. ГОСТ Р. 8.109-97. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента амплитудной модуляций высокочастотных колебаний»
36. ГОСТ Р 8.498-98. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений электрической добротности»

37. ГОСТ Р 6746-94. «ГСИ. Меры электрической емкости. Общие технические требования»
38. ГОСТ Р 8.232-97. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений девиации частоты»
39. ГОСТ Р 7165-93 (МЭК 564-77). «ГСИ. Мосты постоянного тока для измерения сопротивления»
40. ГОСТ Р 29322-93 (МЭК 38-83). «ГСИ. Стандартные напряжения»
41. ГОСТ Р 1983-2001. «ГСИ. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия»
42. ГОСТ Р 8.574-2000. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот от 0,3 до 178,4 ГГц»
43. ГОСТ Р 8.564-96. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот 0...20 кГц»
44. ГОСТ Р 8.565-99. «ГСИ. Порядок установления и корректировки межповерочных интервалов эталонов»
45. ГОСТ Р 14.014-91 «ГСИ. Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний»
46. ГОСТ Р 16.504-91 «ГСИ. Система государственных испытаний продукции. Испытание и контроль качества продукции. Основные термины и определения».
47. ГОСТ Р 27.080-93 (МЭК 516-75) «ГСИ. КАМАК. Модульная система технических средств для обработки данных»
48. ГОСТ Р 51317.4.3-99. «ГСИ. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний»
49. ГОСТ 22.261-94 «ГСИ. Средства измерения электрических и магнитных величин. Общие технические условия»
50. ГОСТ Р 51318.15-99 «ГСИ. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электрического светового и аналогового оборудования. Нормы и методы испытаний»
51. ГОСТ Р 8.568-97. «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения»
52. ГОСТ Р 7590-93 (МЭК 51-4-84). «ГСИ. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 4. Особые требования к частотомерам»
53. ГОСТ Р 8711-93 (МЭК 51-2-84). «ГСИ. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 2. Особые требования к амперметрам и вольтметрам»
54. ГОСТ Р 51317.4.3-99. «ГСИ. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний»
55. ГОСТ 8039-93 (МЭК 51-5-85). «ГСИ. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 5. Особые требования к фазометрам, измерителям коэффициента мощности и синхроскопам»

56. ГОСТ Р 23706-93 (МЭК 51-6-84). «ГСИ. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 6. Особые требования к омметрам (приборам для измерения полного сопротивления) и приборам для измерения активной проводимости»
57. ГОСТ Р 8.562-96. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0,03 до 37,50 ГГц»
58. ГОСТ Р 7746-2001. «ГСИ. Трансформаторы тока. Общие технические условия»
59. ГОСТ Р 22261-94. «ГСИ. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия»
60. ГОСТ Р 51317.4.5-99 «ГСИ. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний»
61. ГОСТ Р 8.569-2000. «ГСИ. Ваттметры СВЧ малой мощности диапазона частот 0,02...178,6 ГГц. Методика поверки и калибровки»
62. ГОСТ Р 8.144-97. «ГОСТ Р 8.144-97. «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,05 до 2 Тл»
63. ГОСТ Р 29279-93 (МЭК 741-82). «ГСИ. Многоканальные амплитудные анализаторы. Характеристики преобразователей интервалов времени в амплитуду и методы испытаний»
64. ГОСТ Р 8.585-2001. «ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования»

Рекомендации по метрологии

1. МИ 1317-96. «ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров»
2. МИ 1837-93 «ГСИ. Типовое положение о контрольно-поверочном пункте территориального органа Госстандарта России»
3. МИ 2090-99 «ГСИ. Определение динамических характеристик линейных аналоговых средств измерений с сосредоточенными параметрами. Общие положения»
4. МИ 2146-98 «ГСИ. Порядок разработки и содержание программ испытаний средств измерений для целей утверждения их типа»
5. МИ 2187-92 «ГСИ. Межповерочные и межкалибровочные интервалы средств измерений. Методика определения»
6. МИ 2230-92 «ГСИ. Методика количественного обоснования поверочных схем при их разработке»
7. МИ 2232-92 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценка погрешностей при ограниченной исходной информации»
8. МИ 2240-98 «ГСИ. Анализ состояния измерений, контроля и испытаний на предприятии, в организации, объединении. Методика и порядок проведения работы»
9. МИ 2246-93 «ГСИ. Погрешности измерений. Обозначения»
10. МИ 2247-93 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения»
11. МИ 2258-93 «ГСИ. Стандартные образцы. Оценка метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений»

12. МИ 2273-93 «ГСИ. Области использования средств измерений, подлежащих поверке»
13. МИ 2277-93 «ГСИ. Система сертификации средств измерений. Основные положения и порядок проведения работ»
14. МИ 2278-93 «ГСИ. Система сертификации средств измерений. Органы по сертификации. Порядок аккредитации»
15. МИ 2284-94 «ГСИ. Документация поверочных лабораторий»
16. МИ 2279-93 «ГСИ. Система сертификации средств измерений. Порядок ведения Реестра Системы»
17. МИ 2301-94 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений»
18. МИ 2304-94 «ГСИ. Метрологический контроль и надзор, осуществляемые метрологическими службами юридических лиц»
19. МИ 2307-94 «ГСИ. Программа и методика ускоренных испытаний с целью подтверждения межповерочных интервалов»
20. МИ 2322-99 «Типовые нормы времени на поверку средств измерений»
21. МИ 2357-95 «ГСИ. Порядок разработки и реализации программ метрологического обеспечения отраслей народного хозяйства, важнейших научно-технических проблем»
22. МИ 2365-96 «ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения»
23. МИ 2377-96 «ГСИ. Разработка и аттестация методик выполнения измерений»
24. МИ 2386-96 «ГСИ. Анализ состояния измерений, контроля и испытаний в центрах (лабораториях), осуществляющих сертификацию продукции и услуг. Методика проведения работы»
25. МИ 2427-97 «ГСИ. Оценка состояния измерений в измерительных и испытательных лабораториях»
26. МИ 2438-97 «ГСИ. Системы измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения»
27. МИ 2439-97 «ГСИ. Метрологические характеристики измерительных систем. Номенклатура. Принципы регламентации определения и контроля»
28. МИ 2440-97 «ГСИ. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов измерительных систем и измерительных комплексов»
29. МИ 2441-97 «ГСИ. Испытания для целей утверждения типа измерительных систем. Общие требования»
30. МИ 2377-98. «ГСИ. Разработка и аттестация методик выполнения измерений»
31. МИ 2492-98 «ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на техническую компетентность в осуществлении метрологического надзора»
32. МИ 2500-98 «ГСИ. Основные положения метрологического обеспечения на малых предприятиях»
33. МИ 3379-93 «Система сертификации средств измерений. Порядок ведения реестра систем»

Правила по метрологии

1. ПР 50-732-93 «ГСИ. Типовое положение о метрологической службе государственных органов управления Российской Федерации и юридических лиц»

2. ПР 50.2.002-94 «ГСИ. Порядок осуществления государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами и соблюдением метрологических правил и норм»
3. ПР 50.2.003-94 «ГСИ. Порядок осуществления государственного надзора за количеством товаров, отчуждаемых при совершении торговых операций»
4. ПР 50.2.007-94 «ГСИ. Поверительные клейма»
5. ПР 50.2.004-94 «ГСИ. Порядок осуществления государственного метрологического надзора за количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже»
6. ПР 50.2.005-94 «ГСИ. Порядок лицензирования деятельности по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений»
7. ПР 50.2.006-94 «ГСИ. Проверка средств измерений. Организация и порядок проведения»
8. ПР 50.2.008-94 «ГСИ. Порядок аккредитации головных и базовых организаций метрологических служб государственных органов управления Российской Федерации и объединений юридических лиц»
9. ПР 50.2.010-94 «ГСИ. Требования к государственным центрам испытаний и порядок их аккредитации»
10. ПР 50.2.009-94 «ГСИ. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений»
11. ПР 502.011-94 «ГСИ. Порядок ведения Государственного Реестра средств измерений»
12. ПР 502.012-94 «ГСИ. Порядок аттестации поверителей средств измерений»
13. ПР 50.2.013-97 «ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право аттестации методик выполнения измерений и проведения метрологической экспертизы документов»
14. ПР 50.2.014-96 «ГСИ. Аккредитация метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений»
15. ПР 50.2.015-94 «ГСИ. Порядок определения стоимости (цены) метрологических работ»
16. ПР 50.2.016-94 «ГСИ. Российская система калибровки. Требования к выполнению калибровочных работ»
17. ПР 50.2.017-95 «ГСИ. Положение о Российской системе калибровки»
18. ПР 50.2.018-95 «ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право проведения калибровочных работ»
19. ПР РСК 001-95 «ГСИ. Типовое положение о калибровочной лаборатории»
20. ПР РСК 002-95 «ГСИ. Калибровочные клейма»

Приложение 2

Основные положения международных рекомендаций ПМГ 29–99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения»

1. Метрология

1. Метрология	Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности
2. Законодательная метрология	Раздел метрологии, включающий комплексы взаимосвязанных общих правил, требований и норм, а также вопросы регламентации и государственного контроля, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений
3. Научная (теоретическая) метрология	Раздел метрологии, занимающейся изучением проблем измерения в целом и образующих измерение элементов: средств и приборов измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и пр.
4. Прикладная метрология	Раздел метрологии, посвященный изучению вопросов практического применения в различных сферах деятельности результатов теоретических исследований
5. Квалиметрия	Учение о методах и приемах измерения качества

2. Физические величины

1. Физическая величина	Свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта
2. Размер физической величины	Количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина»
3. Значение физической величины	Оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц
4. Истинное значение физической величины	Значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта
5. Действительное значение физической величины	Значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него
6. Идеальное значение физической величины	Значение физической величины, являющееся математической моделью конкретных реальных понятий
7. Система физических величин	Совокупность физических величин, связанных между собой зависимостями

8. Основная физическая величина	Физическая величина системы, определяемая независимо от других физических величин этой системы
9. Производная физическая величина	Физическая величина, входящая в систему и определяемая через основные величины этой системы
10. Размерность физической величины	Выражение, отражающее связь величины с основными величинами системы, в котором коэффициент пропорциональности принят равным единице
11. Свойство	Философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношениях к ним
12. Измерительная информация	Информация о значениях измеряемых физических величин
13. Сигнал измерительной информации	Сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной

3. Единицы физических величин

1. Единица физической величины	Физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице
2. Основная единица физической величины	Единица основной физической величины, выбранная произвольно при построении системы единиц
3. Производная единица физической величины	Единица производной физической величины, образуемая по определяющему эту единицу уравнению из других единиц данной системы единиц
4. Система единиц физических величин	Совокупность основных и производных единиц, относящаяся к некоторой системе величин и образованная в соответствии с принятыми принципами
5. Системная единица	Основная или производная единица системы единиц
6. Внесистемная единица	Единица, не входящая ни в одну из систем единиц
7. Кратная единица физической величины	Единица, в целое число раз большая системной или внесистемной единицы
8. Дольная единица физической величины	Единица, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы
9. Оцениваемая физическая величина	Единица измерения, введенная для приписывания физической величине определенного числа
10. Физический параметр	Физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины

4. Измерения

1. Измерения	Нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств
2. Прямое измерение	Измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных

3. Косвенное измерение	Измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям
4. Совокупные измерения	Проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых их значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых или косвенных измерениях различных сочетаний этих величин
5. Совместные измерения	Производимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для нахождения зависимости между ними
6. Абсолютные измерения	Измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких основных величин с использованием значений физических констант
7. Относительные измерения	Измерения соотношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную
8. Равноточные измерения	Измерения какой-либо физической величины, выполненные одинаковыми по точности средствами измерений и в одних и тех же условиях
9. Неравноточные измерения	Измерения какой-либо физической величины, выполненные различными по точности средствами измерений и (или) в разных условиях
10. Оценивание	Операция приписывания данной величине определенного числа, проводимая по установленным правилам
11. Объект измерения	Реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми физическими величинами
12. Принцип измерений	Совокупность физических явлений, на которых основаны измерения
13. Метод измерений	Совокупность приемов использования принципов и средств измерений
14. Метод непосредственной оценки	Метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия
15. Метод сравнения с мерой	Метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой
16. Метод противопоставления	Метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами
17. Дифференциальный метод	Метод сравнения с мерой, в котором на прибор воздействует разность измеряемой и известной величины, воспроизводимой мерой
18. Нулевой метод	Метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля
19. Метод замещения	Метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой
20. Метод совпадения	Метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов

21. Статический режим измерений	Режим измерений, при котором средство измерений работает в статическом режиме
22. Динамический режим измерений	Режим измерений, результатом которого является функциональная зависимость измеряемой величины от времени

5. Виды средств измерения

1. Средство измерения	Техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства
2. Основное средство измерения	Средства измерения той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей
3. Вспомогательное средство измерения	Средство измерений величин, влияющих на метрологические свойства другого средства измерений при его применении или поверке
4. Мера	Средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера
5. Однозначная мера	Мера, воспроизводящая физическую величину одного размера
6. Многозначная мера	Мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера
7. Набор мер	Специально подобранный комплект мер, применяемый не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных величин различного размера
8. Устройство сравнения (компаратор)	Средство измерений, позволяющее сравнивать друг с другом меры однородных величин или же показания однотипных приборов
9. Измерительный прибор	Средство измерений, предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия
10. Аналоговый измерительный прибор	Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины
11. Цифровой измерительный прибор	Измерительный прибор, вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме
12. Измерительные приборы прямого действия	Измерительный прибор, в котором предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, т.е. без применения обратной связи
13. Измерительный прибор сравнения	Измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с известной величиной
14. Измерительный преобразователь	Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения
15. Аналого-цифровой преобразователь	Преобразователь, предназначенный для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код
16. Цифроаналоговый преобразователь	Преобразователь, предназначенный для преобразования цифрового кода в аналоговую величину
17. Первичный измеритель	Измерительный преобразователь, к которому подведена измеряемая величина, т.е. первый в измерительной цепи

18. Измерительная система	Совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в удобной для автоматической обработки форме, ее передачи и использования
19. Компьютерно-измерительная система (виртуальный прибор)	Совокупность средств измерений, состоящая из стандартного или специализированного компьютера со встроенной в него платой (модулем) сбора данных
20. Измерительно-вычислительный комплекс	Совокупность средств измерений и компьютеров, объединенных с помощью устройств сопряжения и предназначенных для измерений, научных исследований и расчетов
21. Информационно-измерительная система	Совокупность функционально объединенных средств измерений, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления

6. Структурные элементы средств измерений

1. Принцип действия средств измерений	Физический принцип, положенный в основу построения средств измерений данного вида
2. Измерительный механизм	Часть конструкции средства измерений, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение
3. Чувствительный элемент средства измерений	Часть первого в измерительной цепи преобразовательного элемента, находящаяся под непосредственным воздействием измеряемой величины
4. Преобразовательный элемент средства измерений	Элемент средства измерений, в котором происходит одно из ряда последовательных преобразований величин
5. Измерительная цепь средства измерений	Совокупность преобразовательных элементов средства измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации
6. Отсчетное устройство средства измерений	Часть конструкции средства измерений, предназначенная для отсчитывания значений измеряемой величины
7. Отсчет	Число, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерений, либо полученное счетом последовательных отметок или сигналов
8. Шкала средств измерений	Часть отсчетного устройства, представляющая собой совокупность отметок и поставленных у некоторых из них чисел отсчета или других символов, соответствующих ряду последовательных значений величины
9. Шкала физической величины	Упорядоченная последовательность значений физической величины, принятая на основании результатов точных измерений
10. Отметка шкалы	Знак на шкале, соответствующий некоторому значению измеряемой величины

11. Числовая отметка шкалы	Отметка шкалы, у которой проставлено число отсчета измеряемой величины
12. Деление шкалы	Число, соответствующее некоторому значению измеряемой величины или указывающее порядковый номер отметки
13. Цена деления шкалы	Разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы
14. Начальное значение шкалы	Наименьшее значение измеряемой величины, указанное на шкале
15. Конечное значение шкалы	Наибольшее значение измеряемой величины, указанное на шкале
16. Шкала порядка	Шкала, упорядочивающая расположение объектов относительно какого-то определенного их свойства
17. Шкала наименований	Шкала, основанная на приписывании объекту цифр (знаков), играющих роль простых имен
18. Условная шкала	Шкала физической величин, исходные значения которой выражены в условных единицах
19. Равномерная шкала	Шкала с делениями постоянной длины (размера) и с постоянной ценой деления
20. Неравномерная шкала	Шкала с делениями непостоянной длины, а в некоторых случаях и с непостоянной ценой деления
21. Указатель	Часть отсчетного устройства; положение которой относительно отметок шкалы определяет показание средства измерений

7. Основные параметры и свойства средств измерений

1. Номинальное значение меры	Значение величины, указанное на мере или приписанное ей
2. Действительное значение меры	Действительное значение величины, воспроизводимое мерой
3. Показания средства измерений	Значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины
4. Градуировочная характеристика средства измерений	Зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы
5. Диапазон показаний	Область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы
6. Диапазон измерений	Область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений
7. Предел измерений	Наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений
8. Влияющая физическая величина	Физическая величина, не являющаяся измеряемой данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений этим средством

9. Коэффициент преобразования преобразователя	Отношение изменения сигнала на выходе измерительного преобразователя, отображающего измеряемую величину, к вызывающему его изменению сигнала на входе преобразователя
10. Чувствительность измерительного прибора	Отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины

8. Погрешности измерений

1. Погрешность измерений	Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины
2. Абсолютная погрешность	Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины
3. Относительная погрешность	Отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины
4. Систематическая погрешность измерения	Составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины
5. Случайная погрешность измерения	Составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины
6. Инструментальная погрешность измерения	Составляющая погрешности измерения, возникающая из-за несовершенства средств измерения
7. Погрешность метода измерений	Составляющая погрешности измерения, происходящая от несовершенства метода измерений
8. Погрешность отсчитывания	Составляющая погрешности измерения, происходящая от недостаточного точного отсчитывания показаний средств измерений
9. Погрешность интерполяции отсчитывания	Составляющая погрешности отсчитывания, происходящая от недостаточного точного оценивания на глаз доли деления шкалы, соответствующей положению указателя
10. Погрешность поверки	Погрешность измерений, имеющая место при проверке средств измерений
11. Наблюдение при измерении	Экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение из группы значений величины, подлежащих совместной обработке для получения результата измерения
12. Результат наблюдения	Значение величины, получаемое при отдельном наблюдении
13. Случайное отклонение результата наблюдения	Разность между результатом наблюдения и средним значением
14. Математическое ожидание	Числовая характеристика, равная среднему арифметическому значению всех результатов измерения величины
15. Среднеквадратическое отклонение результата измерения	Параметр функции распределения результатов измерений, характеризующих их рассеивание и равный корню квадратному из дисперсии результата наблюдения

16. Доверительная вероятность	Вероятность, определяемая степенью доверия к результату измерения и характеризующаяся вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах
17. Доверительные границы погрешности	Верхняя и нижняя границы, в которых находится погрешность с заданной вероятностью
18. Результат измерения	Значение величины, найденное путем ее измерения
19. Поправка	Значение величины, одноименной с измеряемой, которая вводится в результат измерения для исключения систематических погрешностей
20. Точность измерений	Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины
21. Правильность измерений	Метрологическая характеристика, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений
22. Сходимость измерений	Качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях
23. Воспроизводимость измерений	Качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в разное время, в различных местах, различными методами и средствами)

9. Погрешности средств измерений

1. Абсолютная погрешность средства измерения	Разность между номинальным значением меры и истинным значением воспроизводимой ею величины
2. Абсолютная погрешность измерительного прибора	Разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины
3. Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по входу	Разность между значением величины на входе преобразователя, определяемым в принципе по истинному значению величины на его выходе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю, и истинным значением величины на входе преобразователя
4. Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по выходу	Разность между истинным значением величины на выходе преобразователя, отображающей измеряемую величину, и значением величины на выходе, определяемым в принципе по истинному значению величины на входе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю
5. Относительная погрешность измерительного прибора	Отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к истинному значению воспроизводимой (измеряемой) им величины
6. Относительная погрешность измерительного преобразователя по входу (выходу)	Отношение абсолютной погрешности измерительного преобразователя по входу (выходу) к истинному значению величины на входе (к значению величины на выходе, определяемому в принципе по истинному значению величины на входе по градуировочной характеристике, приписанной преобразователю)

7. Приведенная погрешность измерительного прибора	Отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению
8. Статическая погрешность средства измерения	Погрешность средства измерения, используемого для измерения постоянной величины
9. Погрешность средства измерений в динамическом режиме	Погрешность средства измерений, используемого для измерений переменной во времени величины
10. Систематическая погрешность средства измерений	Составляющая погрешности средства измерений, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся
11. Случайная погрешность средства измерения	Составляющая погрешности средства измерения, изменяющаяся случайным образом
12. Основная погрешность средства измерения	Погрешность средства измерения, используемого в нормальных условиях
13. Дополнительная погрешность меры	Изменение погрешности меры вследствие измерения ее действительного значения, вызванного отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области значений
14. Дополнительная погрешность измерительного преобразователя по входу (выходу)	Изменение погрешности измерительного преобразователя по входу (выходу), вызванное отклонением одной из влияющих величин от ее нормального значения или выходом ее за пределы нормальной области значений
15. Пределы допускаемой погрешности средства измерений	Наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению
16. Точность средства измерения	Качество средства измерения, отражающее близость к нулю его погрешности
17. Правильность средства измерения	Качество средства измерения, отражающее близость к нулю его систематических погрешностей
18. Сходимость показаний средства измерений	Качество средства измерений, отражающее близость к нулю его случайных погрешностей
19. Класс точности средства измерения	Обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливают в стандартах на отдельные виды средств измерений

10. Эталоны и образцовые средства измерений

1. Эталон	Средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и/или хранение единицы физической величины с наивысшей точностью для данного уровня развития измерительной техники с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений
2. Первичный эталон	Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью
3. Вторичный эталон	Эталон, значение которого устанавливают по первичному эталону
4. Специальный эталон	Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий для этих условий первичный эталон
5. Государственный эталон	Первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны
6. Эталон-свидетель	Вторичный эталон, предназначенный для проверки сохранности государственного эталона и для замены его в случае порчи или утраты
7. Эталон-копия	Вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц рабочим эталонам
8. Эталон сравнения	Вторичный эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом
9. Рабочий эталон	Эталон, применяемый для передачи размера единицы образцовым средствам измерения высшей точности и в отдельных случаях — наиболее точным рабочим средствам измерений
10. Образцовое средство измерений	Мера, измерительный прибор или измерительный преобразователь, служащие для поверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых
11. Образцовое вещество	Образцовая мера в виде вещества с известными свойствами, воспроизводимыми при соблюдении условий приготовления, указанных в утвержденной спецификации
12. Стандартный образец	Мера для воспроизведения единиц величин, характеризующих свойства или состав веществ и материалов
13. Рабочее средство измерений	Средство измерений, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единиц
14. Поверка	Определение специальным органом метрологической службы метрологических характеристик средства измерений и установление его пригодности к применению на основании результатов контроля их соответствия предъявляемым требованиям
15. Поверочная схема	Нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измерений с указанием методов и погрешности
16. Разряд образцовых средств измерений	Категория образцовых средств измерений, отнесенных к одной и той же ступени поверочной схемы

Приложение 3

Автоматизация обработки результатов прямых измерений с многократными наблюдениями

Для решения указанной задачи на кафедре радиоприборов МИРЭА были разработаны две специализированные программы, представленные ниже. Обе программы работают в среде высокоэффективного и популярного пакета математических и инженерных расчетов MatLab. При выборе данного пакета учитывалось наличие в его составе некоторых базовых операций по обработке данных, а также средств объектно-ориентированного программирования, позволяющих выполнить программы в виде, доступном для немедленного применения пользователями без специальной подготовки.

Исключение промахов из результатов многократных наблюдений. Нефедов В.И., Жакин В.И.

Ввод результатов наблюдений и данных для их обработки. Далее RUN

x1	8.74	x6	8.28	x11	8.44	x16	8.71	Число наблюдений n 18 Уровень значимости критерия ошибки q=0.1, 0.075, 0.05 или 0.025 RUN
x2	8.27	x7	8.52	x12	8.75	x17	8.48	
x3	8.63	x8	8.10	x13	8.37	x18	8.58	
x4	8.38	x9	8.40	x14	8.04	x19	0	
x5	8.61	x10	8.59	x15	8.25	x20	0	

Результат измерения: $\bar{A}_{cp}=8.4522$	СКО наблюдений: $СКО_n=0.20972$	СКО результата измерения: $S(\bar{A}_{cp})=0.049432$	Теоретич. коэффициент $t_{gr}=2.34$

Проверка на t_{gr} наблюдения с миним-м значением	Проверка на t_{gr} наблюдения с максим-м значением	Примечание: 1. Результаты наблюдений вводить без пропуска окон; 2. Свободные окна заполнять нулями
Номер наблюдения: x=14	Номер наблюдения: x=12	
Значение коэф-та $t=1.9656$	Значение коэф-та $t=1.4199$	
Результат проверки на основе сравнения t и t_{gr} : проходит	Результат проверки на основе сравнения t и t_{gr} : проходит	
Абсолютные погрешности результатов наблюдений в окне с аналог-м. именем		

Рис. П.3.1. Исключение грубых погрешностей (промахов)
из результатов многократных наблюдений

Первая программа обеспечивает решение двух задач: исключение грубых погрешностей (промахов) из результатов наблюдений и проверку гипотезы о нормальном распределении этих результатов. Процесс решения точно соответствует описанному в разделе 3.2. При запуске программы формируются три окна, представленные на рис. П.3.1–3.

Данные окна легко переключаются пользователем с помощью кнопок с соответствующими названиями, появляющихся после запуска программы в нижней части командного окна системы MatLab.

При вычислениях пользователь вносит с помощью клавиатуры в соответствующие подокна 1-го окна (рис. П.3.1) результаты многократных наблюдений $x_1 \dots x_{20}$, число наблюдений n и выбранный уровень значимости критерия ошибки q . Затем нажимает с помощью мышки кнопку пуска Run и немедленно получает ответ о том, проходит (или не проходит) минимальный и максимальный из результатов наблюдений проверку на грубую погрешность.

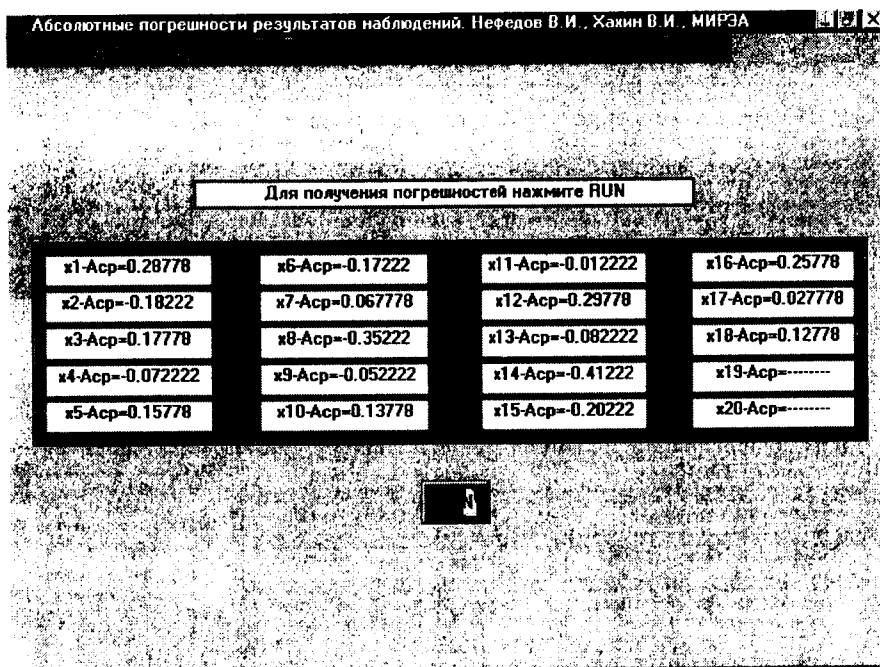


Рис. П.3.2. Вычисление абсолютных погрешностей результатов многократных наблюдений

В варианте на рис. П.3.1 оба таких результата успешно прошли проверку. В противном случае, результаты наблюдений, отнесенные к грубым погрешностям, исключаются пользователем из рассмотрения, и он повторяет перечисленные выше действия до тех пор, пока не получит данные об отсутствии грубых погрешностей среди оставшихся результатов.

Далее пользователь открывает 3-е окно (рис. П.3.3), вводит в соответствующие подокна выбранные значения уровней значимости критериев ошибок q_1 и q_2 и нажимает кнопку Run. Компьютерная программа немедленно выдает сведения о том, принимается ли (или не принимается) гипотеза о нормальном распределении результатов наблюдений по двум критериям (1-му и 2-му).

Если гипотеза о нормальности распределения результатов многократных наблюдений принимается по двум критериям, то пользователь может переходить к последующей обработке наблюдений с помощью 2-й программы.

Проверка гипотезы о норм-ном распр-нии резуль-в наблюдений. Нефедов В.И. Хаким В.И., М...

File Edit Window Help

Ввод данных для обработки результатов наблюдений. Далее RUN

Уровень значимости критерия ошибки $q_1=0.02$ или 0.1 Уровень значимости критерия ошибки $q_2=0.01, 0.02$ или 0.05

Проверка нормальности распределения по критерию 1: $d_{min} < d < d_{max}$

Смещенное СКО наблюдений: СКО _н =0.20381	Значение параметра $d^*=0.83955$	Квантиль распределения $d_{min}=0.68774$	Квантиль распределения $d_{max}=0.90826$	Гипотеза по критерию 1: принимается

Проверка нормальности распределения по критерию 2: $mz \leq -m(n)$

Вероятность $P(n, q_2)/2$ =0.495	Значение параметра $-m(n)=1$	СКО наблюдений СКО _н =0.20972	Значение функции Лапласа $\Phi(z)=0.4949$	Аргумент функции Лапласа $z=2.57$
Коз.фициент $z^*СКО_n$ =0.53898	Результат измерения: Аср=8.4522	Эксперимент-й коз.фициент $mz=0$	Гипотеза по критерию 2: принимается	

x1-Acpl=0.28778	x6-Acpl=0.17222	x11-Acpl=0.012222	x16-Acpl=0.25778
x2-Acpl=0.18222	x7-Acpl=0.067778	x12-Acpl=0.29778	x17-Acpl=0.027778
x3-Acpl=0.17778	x8-Acpl=0.35222	x13-Acpl=0.082222	x18-Acpl=0.12778
x4-Acpl=0.072222	x9-Acpl=0.052222	x14-Acpl=0.41222	x19-Acpl=-----
x5-Acpl=0.15778	x10-Acpl=0.13778	x15-Acpl=0.20222	x20-Acpl=-----

Рис. П.3.3. Проверка гипотезы о нормальном распределении результатов многократных наблюдений

Как видно из рис. П.3.1 и П.3.3, представленной программой, помимо конечных результатов, выдаются многочисленные промежуточные, используемые в процессе ознакомления студентов с алгоритмами ее работы. С этой же целью используется окно абсолютных погрешностей результатов наблюдений, показанное на рис. П.3.2.

Вторая программа обеспечивает окончательную обработку результатов многократных наблюдений, т.е. получение результата измерения и границы его погрешности. При запуске этой программы формируется окно, приведенное на рис. П.3.4.

Пользователь вносит в подокна $x_1, \dots, x_{20}$ результаты многократных наблюдений, в подокна $Q_1, \dots, Q_5$ — значения границ НСП, а также в соответствующие подокна данные о числе наблюдений n , числе m границ НСП и выбранной доверительной вероятности P_d . Затем запускает программу, нажимая кнопку Run. Программой выдаются важнейшие промежуточные результаты статистической обработки, а также указанные выше конечные. Рекомендуемое максимальное число наблюдений $n_{\max}$ выдается при условии $Q \geq 8 S(A_{CP})$, где Q — общая граница всех НСП, $S(A_{CP})$ — СКО результата измерения.

Обработка результатов прямых измерений с многократными наблюдениями. Хаким В.И. МИРЭА

Ввод результатов наблюдений и данных для их обработки. Далее RUN

x1 8.74	x6 8.28	x11 8.44	x16 8.71	Q1 0.05	← Ввод границ Qi НСП Число наблюдений n 18 Доверит-ная вер-ность $P_d=0.95$ для $m=0$ или 0.99 для $m=2$ 0.95 Число границ m НСП 1
x2 8.27	x7 8.52	x12 8.75	x17 8.48	Q2 0	
x3 8.63	x8 8.10	x13 8.37	x18 8.58	Q3 0	
x4 8.38	x9 8.40	x14 8.04	x19 0	Q4 0	
x5 8.61	x10 8.59	x15 8.25	x20 0	Q5 0	

Результат измерения: $A_{CP}=8.4522$	СКО результата измерения: $S(A_{CP})=0.049432$	Коеффициент Стьюдента: $t(P_d, n)=2.11$	Довер.гран.случ. погр-и: $t(P_d, n) \cdot S(A_{CP})$ =0.1043	Коеффициент k =1.1
Общая граница всех НСП $Q(k, Q_i, m)$ =0.055	Соотношение между Q и $S(A_{CP})$: $0.8 \cdot S(A_{CP}) < Q < 8 \cdot S(A_{CP})$	Граница погрешности результата измерения delta: $K \cdot S_{сум}=0.11646$		
СКО наблюдений S_{COn} =0.20972	Рекоменд-ное число наблюд-й $n_{\max}$ =			

Примечание: 1. Результаты наблюдений и границы Qi вводить без пропуска окон; 2. Свободные окна заполнять нулями; 3. Полная запись результата измерения: $A_{CP} \pm \delta = 5.25 \pm 0.12$.

Рис. П.3.4. Обработка результатов прямых измерений с многократными наблюдениями

Приложение 4

***H*-функция и ее применение для формирования некоторых сложных измерительных сигналов**

Для формирования сложных измерительных сигналов можно воспользоваться *H*-функцией, предложенной В.И. Хахиным и В.И. Нефедовым. Функция описывает положительный импульс различной формы (трапецеидальной, треугольной, пилообразной, прямоугольной и близкой к прямоугольной) с единичной амплитудой. Ее аналитическое представление:

$$H(t) = \frac{1}{2t_{\phi}} \left(|t - t_3| - |t - t_3 - t_{\phi}| \right) - \frac{1}{2t_c} \left(|t - w| - |t - w - t_c| \right),$$

где $w = t_3 + t_{\phi} + t_{\text{пв}}$; $t_3 \geq 0$ — начальная задержка импульса; $t_{\phi} > 0$ и $t_c > 0$ — длительности соответственно фронта и спада по основанию импульса; $t_{\text{пв}} \geq 0$ — длительность плоской вершины. В последующем изложении для параметров *H*-функции используются следующие обозначения: $t_3 = tz$, $t_{\phi} = fr$, $t_c = sp$, $t_{\text{пв}} = le$, а сама функция записывается как $H(t, fr, le, sp)$.

Форма импульса зависит от выбора параметров *fr*, *sp* и *le*. На рис. П.4.1 представлен ряд возможных вариантов формы импульса $u(t)$ при начальной задержке $tz = 0$.

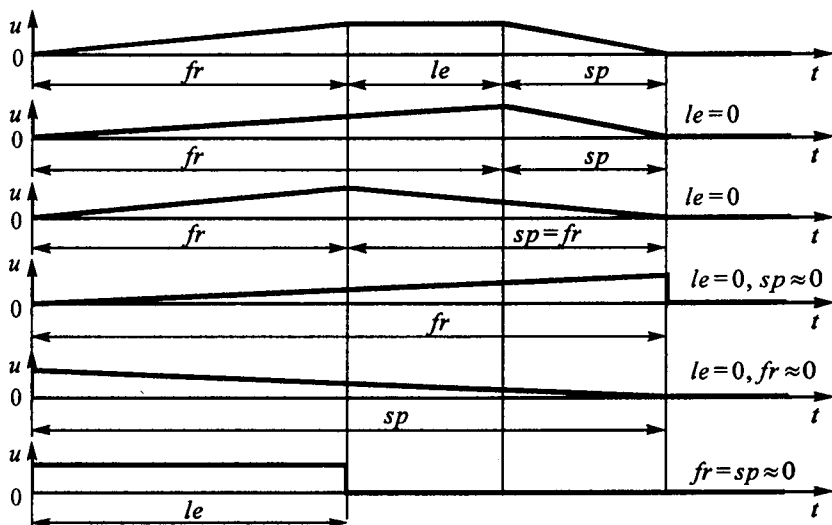


Рис. П.4.1. Варианты формируемых импульсов

Формирование последовательности из m импульсов, следующих с периодом $T \geq (fr + le + sp)$, выполняется согласно формуле:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{m-1} H(t - iT, fr, le, sp).$$

Рассмотрим некоторые применения H -функции. Отметим, что далее на всех рисунках по оси абсцисс отложено нормированное время, а по оси ординат — нормированная амплитуда сигнала $u(t)$.

1. Формирование АМ-сигнала с модуляцией по закону, соответствующему форме H -функции:

$$u_{AM}(t) = U_n [1 + MH(t, fr = sp = nT, le = 0)] \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right),$$

где U_n и T — соответственно амплитуда и период несущего колебания; nT — длительность фронта (спада) модулирующего сигнала; M — коэффициент модуляции.

На рис. П.4.2 приведен случай для $U_n = 1$; $T = 1$; $n = 5$; $M = 2$.

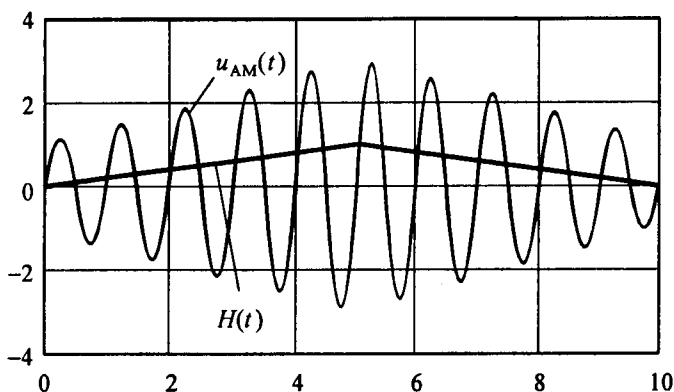


Рис. П.4.2. Формирование АМ-сигнала

2. Формирование ЧМ-сигнала с модуляцией по закону, соответствующему форме H -функции:

$$u_{ЧМ}(t) = U_n \sin \int_0^t \omega(t) dt;$$

$$\omega(t) = \frac{2\pi}{T} + \frac{2\pi k}{T} H(t, fr = sp = nT, le = 0),$$

где U_n и T — соответственно амплитуда и период несущего колебания; k — размерный коэффициент пропорциональности между частотой и напряжением; nT — длительность фронта (спада) модулирующего сигнала.

На рис. П.4.3 дан вариант формирования ЧМ-сигнала при $U_n = 1$; $T = 0,2$; $k = 3$; $n = 5$.

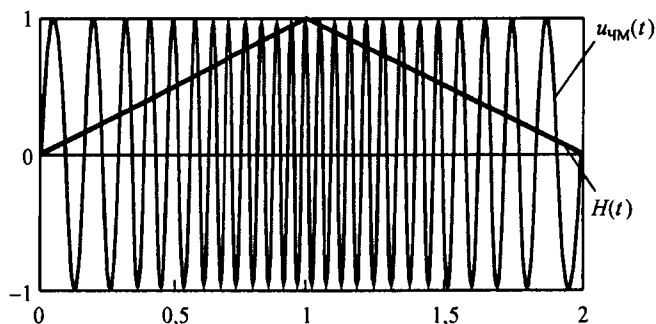


Рис. П.4.3. Формирование ЧМ-сигнала

3. Формирование последовательности импульсов с АИМ при модуляции по синусоидальному закону:

$$u_{\text{АИМ}}(t) = \sum_{i=0}^{m-1} \left[1 + M \sin \frac{2\pi t}{nT} \right] H(t - iT, fr = sp \approx 0, le = kT),$$

где T , kT и M — соответственно период, длительность и коэффициент модуляции импульсов; nT — период модулирующих колебаний; m — число периодов импульсов.

На рис. П.4.4 представлен вариант, когда $T = 1$; $k = 0,25$; $M = 0,25$; $n = 10$, $m = 15$.

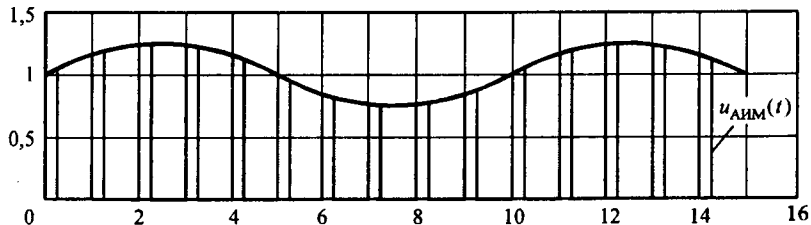


Рис. П.4.4. Формирование АИМ-сигнала

4. Формирование последовательности импульсов с ШИМ при модуляции по синусоидальному закону:

$$u_{\text{ШИМ}}(t) = \sum_{i=0}^{m-1} H[t - iT, fr = sp \approx 0, le(i)];$$

$$le(i) = le \left(1 + M \sin \frac{2\pi i}{k} \right),$$

где T , le и M — соответственно период, исходная длительность и коэффициент модуляции длительности импульсов; $T_0 = kT$ — период модулирующего колебания; k — четное число; m — число периодов импульсов.

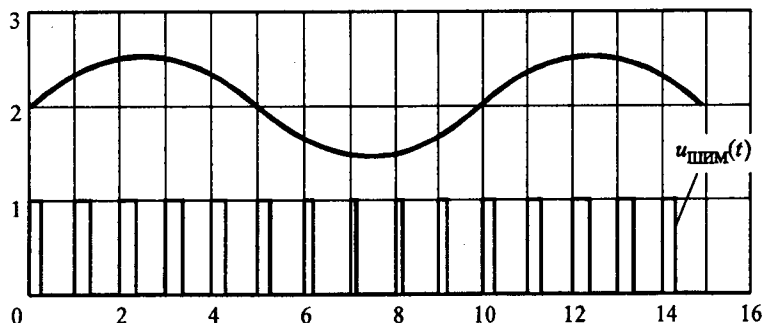


Рис. П.4.5. Формирование последовательности импульсов с ШИМ по синусоидальному закону

На рис. П.4.5 представлена диаграмма формирования сигнала для $T = 1$; $le = 0,25$; $M = 0,5$; $k = 10$; $m = 15$.

5. Формирование последовательности импульсов с ФИМ при модуляции по синусоидальному закону:

$$u_{\text{ФИМ}}(t) = \sum_{i=0}^{m-1} H[t - t_s(i), fr = sp \approx 0, le],$$

$$t_s(i) = Ti + \Delta T \sin \frac{2\pi i}{k},$$

где T , le и ΔT — соответственно период, длительность и максимальное изменение задержки (фазы) импульсов; $T_0 = kT$ — период модулирующего колебания; k — четное число.

На рис. П.4.6 представлена диаграмма формирования сигнала в виде последовательности импульсов с ФИМ, когда заданы следующие параметры: $T = 1$; $le = 0,1$; $\Delta T = 0,25$; $k = 10$.

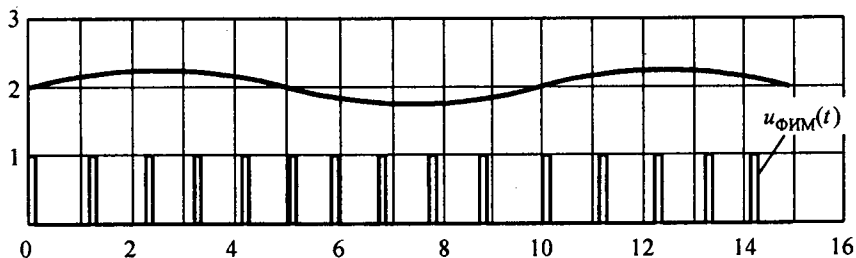


Рис. П.4.6. Формирование последовательности импульсов с ФИМ по синусоидальному закону

6.1. Формирование последовательности радиоимпульсов с нулевой начальной фазой:

$$u(t) = u_1(t) U_n \sin \frac{2\pi t}{T};$$

$$u_1(t) = \sum_{i=0}^{m-1} H(t - ikT, fr = sp \approx 0, le = nT),$$

где U_n и T — соответственно амплитуда радиоимпульса и период колебаний его высокочастотного заполнения; nT и kT — длительность и период следования радиоимпульсов соответственно; m — число периодов импульсов; k и n — целые числа; $k - n = 1, 2, 3$ и т.д.

На рис. П.4.7 показано формирование указанного сигнала при $U_n = 1$; $T = 1$; $k = 4$; $n = 3$; $m = 3$.

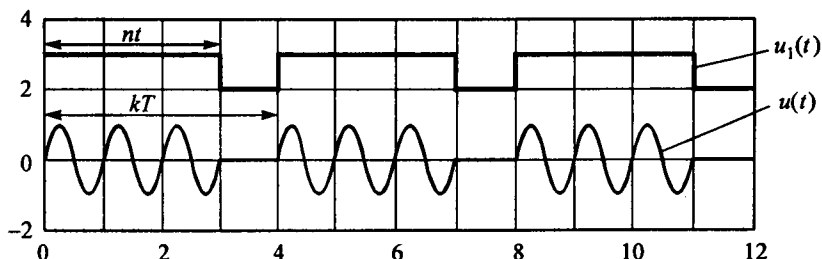


Рис. П.4.7. Последовательность радиоимпульсов с нулевой начальной фазой

6.2. Последовательность радиоимпульсов с начальной фазой, изменяющейся на 180° — предыдущее выражение при $k - n = 0, 5$; $1, 5$; $2, 5$ и т.д.

На рис. П.4.8 представлен вариант формирования радиоимпульсов, когда заданы такие параметры: $U_n = 1$; $T = 1$; $n = 3$; $k = 4, 5$.

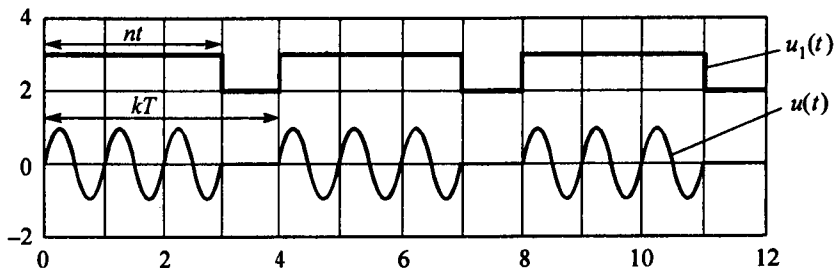


Рис. П.4.8. Последовательность радиоимпульсов с начальной фазой, изменяющейся на 180°

7. Дискретизация аналогового сигнала $Y(t)$ с последующим расширением импульсов дискретизации:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{m-1} Y(t - iT_d) H(t - iT_d, fr = sp \approx 0, le \leq T_d),$$

где $T_d = T/k$ — период дискретизации; T — период (длительность) сигнала $Y(t)$; k — целое число периодов дискретизации; $m \geq k$.

На рис. П.4.9 приведен пример дискретизации синусоидального сигнала, когда $Y(t) = U_m \sin(2\pi t/T)$; $U_m = 1$; $T = 20$; $k = 20$; $T_d = 1$; $le = 0,4$; $m = 20$.

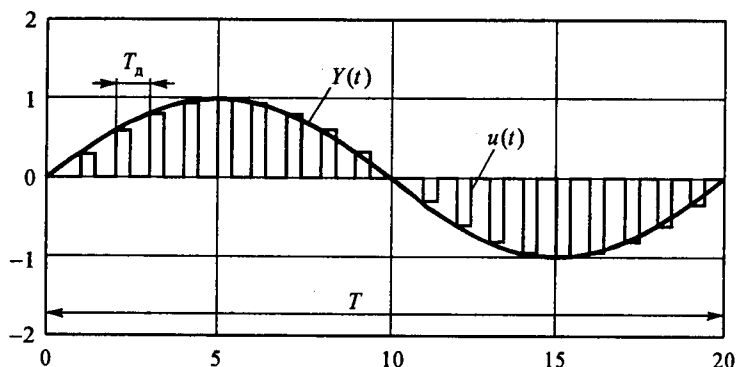


Рис. П.4.9. Дискретизация синусоидального сигнала с последующим расширением импульсов дискретизации

8. Вид амплитудно-импульсной модуляции сигнала $Y(t)$:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{m-1} Y(t) H(t - iT_d, fr = sp \approx 0, le \leq T_d),$$

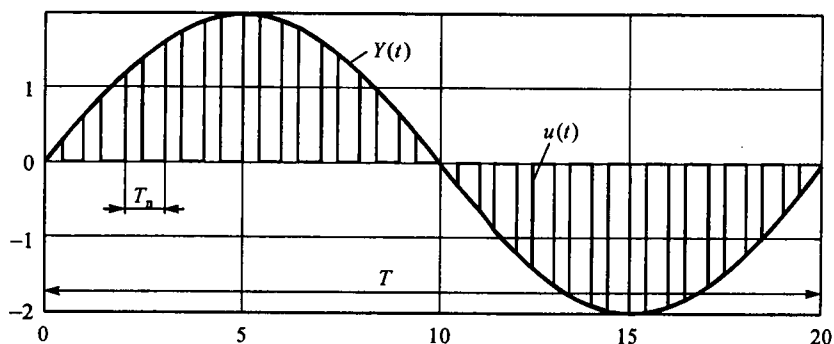


Рис. П.4.10. Амплитудно-импульсная модуляция

На рис. П.4.10 приведен АИМ-сигнал при $Y(t) = U_m \sin(2\pi t/T)$; $U_m = 1$; $T = 20$; $k = T/T_d = 20$; $T_d = 1$; $le = 0,4$; $m = 20$.

9. Кусочно-линейная аппроксимация гладкой однополярной функции $Y(t)$ (на интервале аппроксимации $0 \leq t \leq T$ при числе интервалов m):

$$u(t) = \sum_{i=0}^{m-1} Y_1(i) H[t - ia, fr = a, sp \approx 0, \tau = (m - i - 1)a];$$

$$Y_1(i) = Y[(i + 1)a] - Y(ia), \quad a = T/m.$$

На рис. П.4.11, а приведена аппроксимация функции $Y_1(t) = \exp[(t/b)^k] - 1$ при $b = 2$; $k = 1$; $T = 4$; $m = 3$, а на рис. П.4.11, б — функции $Y_2(t) = 1 + \sin[(2\pi/T)(t - 0,25T)]$ при $T = 2$; $m = 8$.

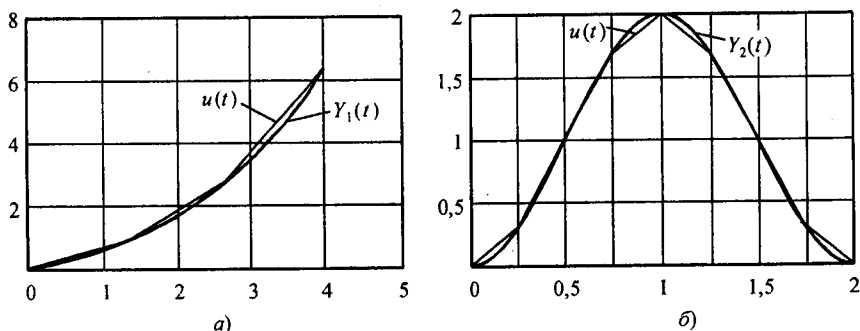


Рис. П.4.11. Кусочно-линейная аппроксимация функций:
а — $Y_1(t)$; б — $Y_2(t)$

Для аппроксимации периодических функций с периодом T на интервале $0 \leq t \leq nT$ требуется дополнительно вычислить сумму:

$$us(t) = \sum_{j=0}^{n-1} u(t - jT).$$

10. Ступенчатая аппроксимация при равномерной дискретизации

10.1. Варианты ступенчатой аппроксимации пилообразного (треугольного) сигнала $Y(t) = U_m H(t, fr = T_1, sp = T_2, le = 0)$:

$$u(t) = \frac{U_m}{m} \sum_{i=0}^{m-1} H_1[t - t_3(i), fr = sp \approx 0, le(i)];$$

1-й вариант: $t_3(i) = T_1 i / m, \quad le(i) = T(1 - i / m);$

2-й вариант: $t_3(i) = T_1 i / m, \quad le(i) = T(1 - i / m) - T_2 / m;$

3-й вариант: $t_3(i) = T_1 (i + 1) / m, \quad le(i) = T(1 - i / m) - T_1 / m;$

где $T = T_1 + T_2$; T_1 и T_2 — соответственно длительности фронта и спада пилообразного сигнала; m — число интервалов дискретизации в пределах интервалов времени T_1 и T_2 .

На рис. П.4.12 приведены аппроксимации сигнала $Y(t)$ при $U_m = 1$; $T_1 = 1,6$; $T_2 = 0,4$ и $m = 7$. Для 1-го, 2-го и 3-го вариантов сигналы обозначены как $u_1(t)$, $u_2(t)$ и $u_3(t)$, соответственно.

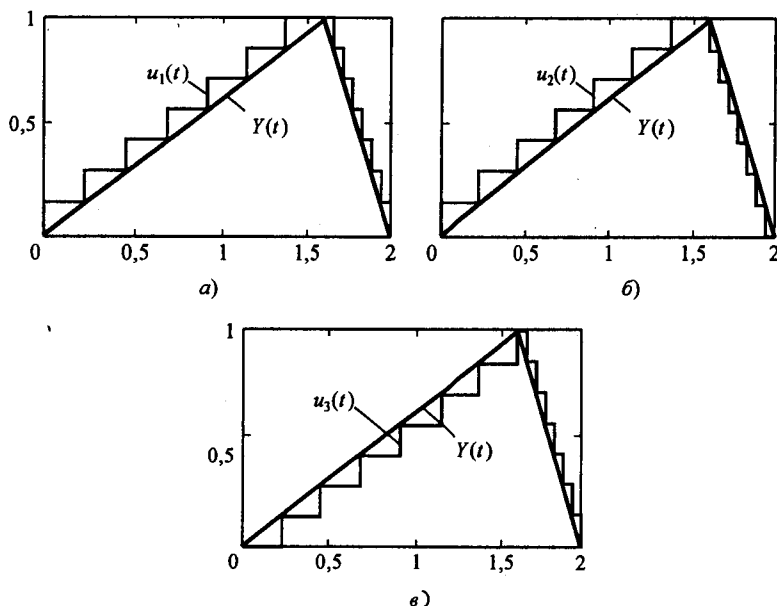


Рис. П.4.12. Варианты аппроксимации сигнала $Y(t)$:
а — первый; б — второй; в — третий

10.2. Варианты аппроксимации синусоидального сигнала $Y(t) = U_m[1 + \sin(2\pi t/T - \pi/2)]$ запишутся как:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{m-1} [Y(i+1) - Y(i)] H_2[t - t_3(i), fr = sp \approx 0, le = T/2];$$

1-й вариант: $t_3(i) = iT/(2m)$,

2-й вариант: $t_3(i) = (i+1)T/(2m)$,

где дискретные функции $Y(i+1)$ и $Y(i)$ получены заменой в непрерывной функции $Y(t)$ аргумента t на $(i+1)$ и i соответственно; m — число интервалов дискретизации времени на отрезке $0 \dots T/2$.

На рис. П.4.13 приведены оба варианта аппроксимации сигнала $Y(t)$ при $U_m = 1$, $T = 1$ и $m = 7$. Для 1-го и 2-го вариантов сигналы $u(t)$ обозначены через $u_1(t)$ и $u_2(t)$ соответственно.

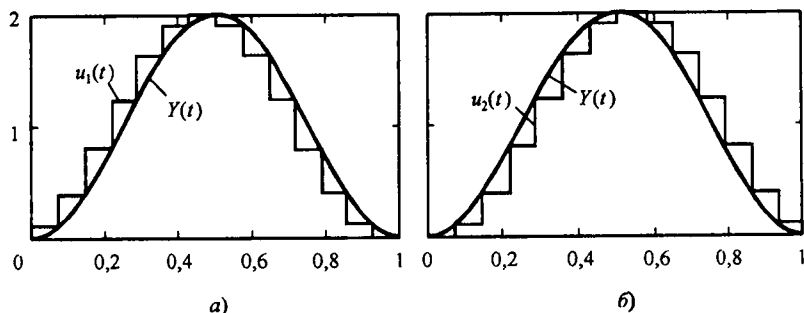


Рис. П.4.13. Варианты аппроксимации синусоидального сигнала:
а — первый; б — второй

11. Ступенчатая аппроксимация сигналов при равномерном квантовании уровней

11.1. Аппроксимация пилообразного сигнала $Y(t) = U_m H(t, fr = T_1, sp = T_2, le = 0)$:

$$u(t) = \frac{U_m}{m} \sum_{i=1}^m H[t - t_s(i), fr = sp \approx 0, le(i)];$$

$$t_s(i) = T_1(i - 0,5) / m, \quad le(i) = T(1 - i / m) + 0,5T / m,$$

где $T = T_1 + T_2$, T_1 и T_2 — длительности фронта и спада сигнала, m — число уровней квантования.

На рис. П.4.14, а приведен график аппроксимации пилообразного сигнала $Y(t)$ при $U_m = 1$; $T_1 = 1,5$; $T_2 = 0,5$ и $m = 8$.

На рис. П.4.14, б приведен вариант аппроксимации колоколообразного сигнала $Y(t)$ при $U_m = 1$, $T = 1$ и $m = 8$.

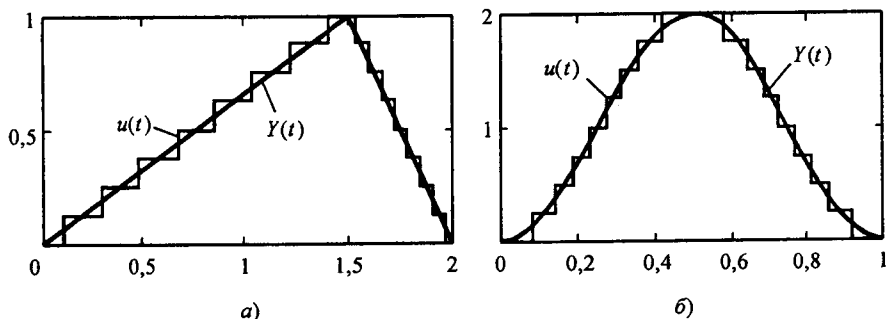


Рис. П.4.14. Варианты аппроксимации сигналов:
а — пилообразного; б — синусоидального

11.2. Синусоидальный сигнал $Y(t) = U_m \{1 + \sin[(2\pi/T)(t - 0,25T)]\}$:

$$u(t) = \frac{2U_m}{m} \sum_{i=1}^m H[t - t_3(i), fr = sp \approx 0, le(i)];$$

$$t_3(i) = \frac{T}{4} + \frac{T}{2\pi} \arcsin\left(\frac{2i-1}{m} - 1\right), \quad le(i) = T - 2t_3(i).$$

12. Формирование входного и выходных импульсов двоичного синхронного счетчика с коэффициентом деления 2^n

Последовательность из m входных прямоугольных импульсов с амплитудой U_m , периодом T и длительностью $\tau_n < T$:

$$u_0(t) = U_m \sum_{i=0}^{m-1} H(t - iT, fr = sp \approx 0, le = \tau).$$

Если $k = 1, 2, 3, \dots, n$ — номер разряда счетчика, то выходные импульсы k -го разряда описываются выражением:

$$u_k(t) = U_m \sum_{i=0}^{m-1} H_k[t - t_k(i), fr = sp \approx 0, le_k = T2^{k-1}];$$

$$t_k(i) = T(i2^k + 2^{k-1} - 1).$$

На рис. П.4.15 приведены входные и выходные импульсы 4-разрядного счетчика при $U_m = 1$, $T = 0,2$, $\tau_n = 0,05$ и $m = 20$.

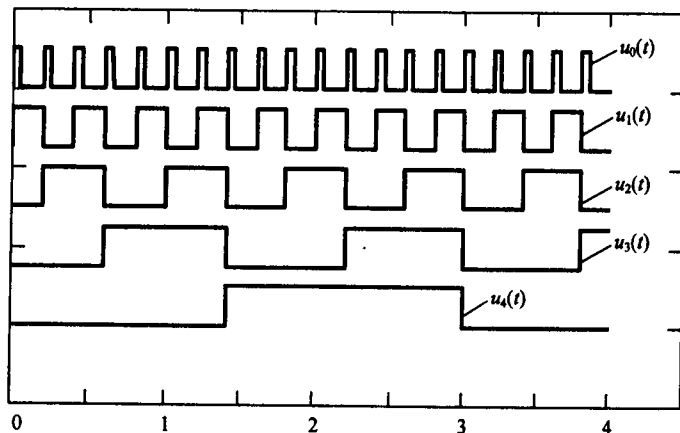


Рис. П.4.15. Формирование входных и выходных импульсов 4-разрядного счетчика

13. Формирование выходного сигнала двустороннего ограничителя

В данном случае входной сигнал $Y(t)$ ограничивается сверху по уровню E_1 и снизу по уровню E_2 , где $0 \leq E_1 \leq U_m$ и $-U_m \leq E_2 \leq 0$.

При входном гармоническом сигнале $Y(t) = U_m \sin(2\pi t/T)$ выходной сигнал ограничителя $u(t)$ запишется как:

$$u(t) = u_1(t) - [u_1(t) - E_2]H_2(t - t_{32}, le_2);$$

$$u_1(t) = Y(t) - [Y(t) - E_1]H_1(t - t_{31}, le_1),$$

где для всех H -функций $fr = sp \approx 0$, а остальные параметры приведены в табл. П.4.1.

Таблица П.4.1

Номер H -функции	Значения t_s	Значения le
H_1	$t_{31} = c_1$	$le_1 = 0,5T - 2c_1$
H_2	$t_{32} = 0,5T - c_2$	$le_2 = 0,5T + 2c_2$
$c_1 = \frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{E_1}{U_m}, \quad c_2 = \frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{E_2}{U_m}$		

На рис. П.4.16 приведен пример ограничения синусоидального сигнала $Y(t)$ по уровням $E_1 = 0,5$ и $E_2 = -0,8$ при $U_m = 1$.

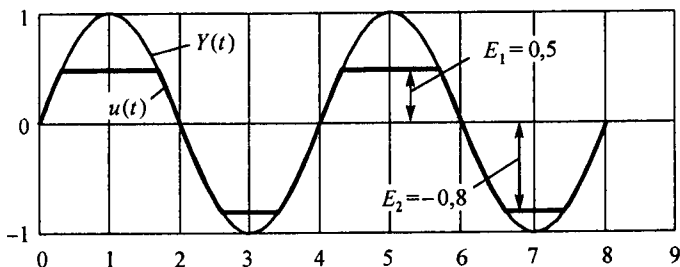


Рис. П.4.16. Двустороннее ограничение синусоидального сигнала

14. Формирование выходного сигнала компаратора при синусоидальном входном сигнале

$$Y(t) = U_m \sin(2\pi t/T).$$

Компаратор имеет порог срабатывания $-U_m \leq E \leq U_m$ и его выходной сигнал:

$$u(t) = U \sum_{i=0}^{m-1} H(t - iT - c, fr = sp \approx 0, le = 0,5T - 2c);$$

$$c = \frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{E}{U_m},$$

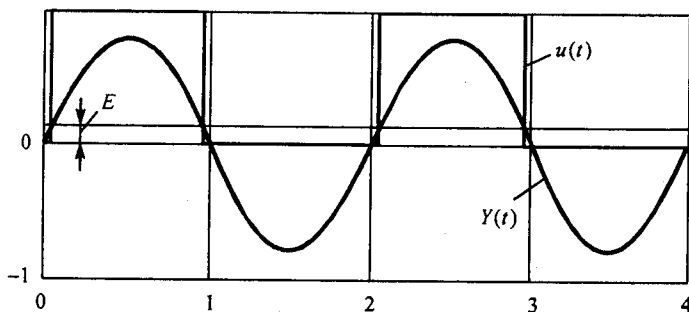


Рис. П.4.17. Формирование выходного сигнала компаратора

где U — амплитуда импульсов выходного сигнала; m — число периодов входного сигнала.

На рис. П.4.17 дан пример формирования сигнала $u(t)$ при $T = 2$; $U_m = 0,8$; $E = 0,1$; $U = 1$ и $m = 2$.

15. Формирование выходных сигналов логических элементов

Рассмотрим двухвходовые логические элементы, на которые поступают следующие последовательности импульсов:

$$Y_1(t) = \sum_{i=0}^{m-1} H_1(t - iT_1 - tz_1, \text{fr} = sp \approx 0, le_1);$$

$$Y_2(t) = \sum_{i=0}^{m-1} H_2(t - iT_2 - tz_2, \text{fr} = sp \approx 0, le_2),$$

где T_1, tz_1, le_1 и T_2, tz_2, le_2 — соответственно периоды повторения, начальные задержки и длительности импульсов.

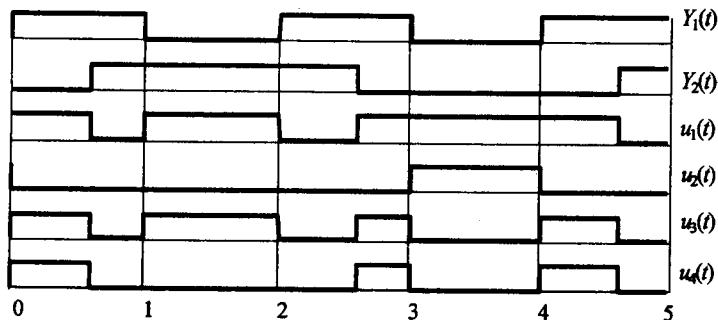


Рис. П.4.18. Выходные сигналы логических элементов

Выходной сигнал элемента 2И-НЕ:

$$u_1(t) = 1 - Y_1(t)Y_2(t).$$

Выходной сигнал элемента 2ИЛИ-НЕ:

$$u_2(t) = [1 - Y_1(t)][1 - Y_2(t)].$$

Выходной сигнал элемента «Исключающее ИЛИ»:

$$u_3(t) = [Y_1(t) - Y_2(t)]^2.$$

Выходной сигнал элемента запрета:

$$u_4(t) = Y_1(t)[1 - Y_2(t)].$$

На рис. П.4.18 приведены входные сигналы $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ с параметрами $T_1 = 2$; $t_{z1} = 0$; $l_{e1} = 1$ и $T_2 = 4$; $t_{z2} = 0,6$; $l_{e2} = 2$ и соответствующие им выходные $u_1(t)$, ..., $u_4(t)$. Все сигналы имеют единичную амплитуду.

Проверка справедливости для любого t производится по таблицам истинности (табл. П.4.2).

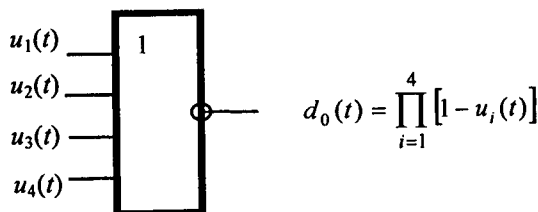
Таблица П.4.2

2И-НЕ			2ИЛИ-НЕ			Исключающее ИЛИ			Элемент запрета		
Y_1	Y_2	u	Y_1	Y_2	u	Y_1	Y_2	u	Y_1	Y_2	u
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0

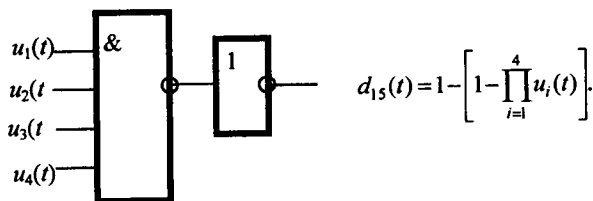
16. Дешифраторы состояния двоичного счетчика

В качестве примера ниже рассматриваются дешифраторы состояния 4-разрядного счетчика с коэффициентом деления $2^4 = 16$. Входной $u_0(t)$ и выходные $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $u_4(t)$ сигналы счетчика аналогичны приведенным на рис. П.4.15.

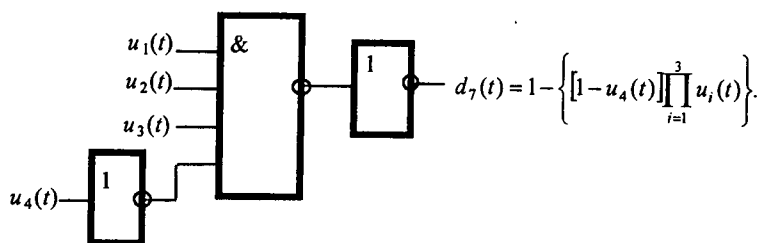
1. Схема и выходной сигнал $d_0(t)$ дешифратора нулевого состояния:



2. Схема и выходной сигнал $d_{15}(t)$ дешифратора 15-го (единичного) состояния:



3. Схема и выходной сигнал $d_7(t)$ дешифратора 7-го состояния, когда $u_1(t) = 1$; $u_2(t) = 1$; $u_3(t) = 1$; $u_4(t) = 0$:



Результаты расчета входных и выходных сигналов дешифраторов, а также входного сигнала счетчика $u_0(t)$ приведены на рис. П.4.19.

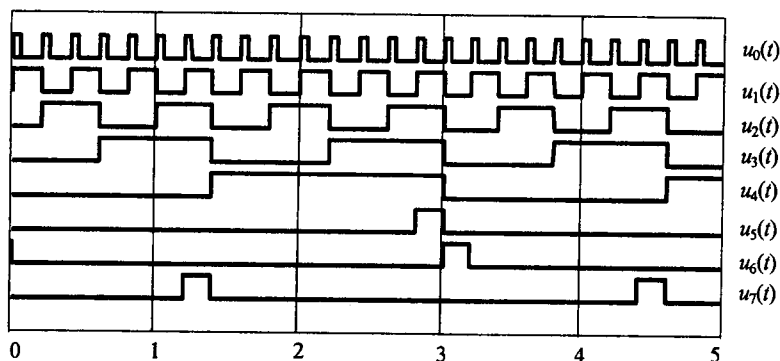


Рис. П.4.19. Входные и выходные сигналы дешифраторов и входной сигнал счетчика

17. Формирование выходного сигнала устройства «двоичный счетчик в режиме увеличения кода — ЦАП»

Выходной сигнал устройства $c(t)$ для n -разрядных счетчика и ЦАП:

$$c(t) = \frac{\Delta}{2^{n-1}} \sum_{i=1}^n 2^{i-1} u_i(t),$$

где $\Delta/2^{n-1}$ — шаг квантования ЦАП; $u_i(t)$ — выходные сигналы счетчика.

На рис. П.4.20 приведены результаты расчета выходного сигнала $c(t)$ при $\Delta = 1,5$ для 4-разрядного ЦАП и его входных сигналов $u_i(t)$, параметры которых соответствуют п.12.

18. Формирование сигналов устройства «двоичный счетчик в режиме уменьшения кода — ЦАП»

Выражение для последовательности входных импульсов счетчика $u_0(t)$ приведено в п.12. Они имеют период T и длительность $\tau_n < T$.

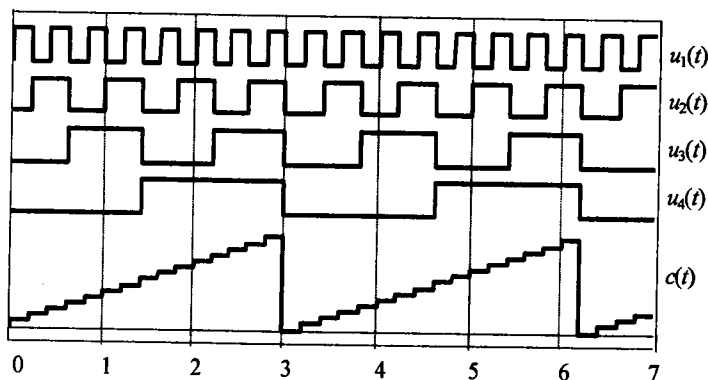


Рис. П.4.20. Входные и выходной сигнал 4-разрядного ЦАП

Если $k = 1, 2, 3, \dots, n$ — номер разряда счетчика, то выходной сигнал k -го разряда:

$$u_k(t) = U_m \sum_{i=0}^{m-1} H_k \left[t - iT2^k, \text{ fr} = sp \approx 0, \text{ le}_k = T2^{k-1} \right].$$

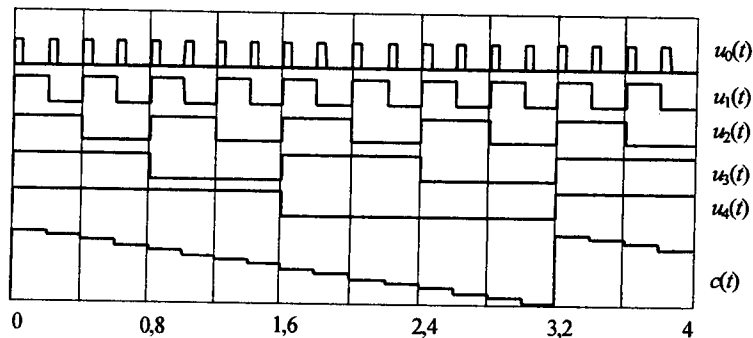


Рис. П.4.21. Входные и выходной сигналы 4-разрядного счетчика

Выходной сигнал ЦАП $c(t)$ задается формулой, приведенной в п.17.

На рис. П.4.21 даны результаты расчета выходных сигналов 4-разрядного счетчика $u_1(t) \dots u_4(t)$ при периоде $T = 0,2$ его входных импульсов $u_0(t)$, а также сигнал $c(t)$, соответствующий шагу квантования $\Delta/2^3 = 0,15/8$ (см. п.17).

ЛИТЕРАТУРА

1. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. В.И. Нефедов, В.И. Хахин, Е.В. Федорова и др. /Под ред. профессора В.И. Нефедова. – М.: Высшая школа, 2001.
2. *Сергеев А.Г., Крахин В.В.* Метрология. – М.: Логос, 2000.
3. *Рабинович С.Г.* Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978.
4. *Девбета Л.И., Лячнев В.В., Сирая Т.Н.* Основы теоретической метрологии. /Под ред. В.В. Лячнева. – С.Пб.: Изд-во С.ПбГЭТУ ЛЭТИ, 1999.
5. *Рудзит Я.А., Плуталов В.Н.* Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении. – М.: Машиностроение, 1991.
6. *Дворяшин Б.В.* Основы метрологии и радиоизмерения. – М.: Радио и связь, 1993.
7. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Информационно-измерительная техника и технологии. В.И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин и др. /Под ред. Г.Г. Раннева. – М.: Высшая школа, 2002.
9. *Нефедов В.И.* Основы радиоэлектроники и связи. – М.: Высшая школа, 2002.
10. *Класен К.Б.* Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. – М.: Постмаркет, 2000.
11. *Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С.* Метрология, стандартизация и технические средства измерений. – М.: Высшая школа, 2003.
12. *Харт Х.* Введение в измерительную технику. – М.: Мир, 1999.
13. *Кузнецов В. А., Ялунина Г. А.* Основы метрологии: Учебное пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1995.
14. Использование виртуальных инструментов /Под ред. Демирчана К.С. и Миროнова В.Г. – М.: Солон-Р, Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 1999.
15. *Назаров Н.Г.* Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высшая школа, 2002.
16. *Мирский Г.Я.* Электронные измерения. – М.: Радио и связь, 1986.
17. *Резо К.Г.* Метрологическая обработка результатов технических измерений. – Киев: Техника, 1987.
18. *Елизаров А.С.* Электрорадиоизмерения. – Минск: Высшая школа, 1986.
19. *Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г.* Электрорадиоизмерения. /Под ред. проф. В.И. Винокурова. – М.: Высшая школа, 1986.
20. *Сергеев А.Г., Латышев М.В.* Сертификация. Учебное пособие для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2001.
21. *Никифоров А.Д., Бакиев Т.А.* Метрология, стандартизация и сертификация. – М.: Высшая школа, 2002.
22. Измерения в электронике: Справочник. В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др. /Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
23. Государственные стандарты. /Ком. Рос. Федерации по стандартизации метрологии и сертификации. – М.: Изд-во стандартов, 2001. В 4-х т.
24. *Власов А.Д., Мурин Б.П.* Единицы физических величин в науке и технике: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
25. *Кураков Л.П., Данилов И.П.* Метрология, стандартизация и сертификация: Терминологический словарь. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гелиос АРВ, 2000.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Амперметр** 212
Анализ сигнала
– параллельный 333
– последовательный 334
– спектральный 338, 406
Анализатор спектра 331, 342, 349
– высокочастотный 332
– низкочастотный 332
– осциллографический 332
– параллельный 333
– последовательный 334
– сверхвысокочастотный 332
– широкодиапазонный 332
– цифровой 338, 342, 346
Ансамбль реализаций 386
Аттенюатор 224, 234, 319, 374
– волноводный 320
– коаксиальный 319
– поглощающий 320
– полосковый 319
– предельный 320

Безопасность 433
Болометр 232, 317
Быстродействие 47, 200

Ваттметр 313
– калориметрический 320
– на «горячих электронах» 323
– перемножителях 314
– поглощающего типа 316
– пондермоторный 326
– проходящей мощности 321
– с преобразователем Холла 322
– терморезисторный 316
– цифровой 327
– электродинамический 313
Величина 16
– дополнительная 18, 21
– идеальная 16
– измеряемая 17, 37, 3909
– нефизическая 16
– основная 18, 20
– оцениваемая 17
– производная 18, 21
– реальная 16
– случайная 69
– физическая 16, 17, 18
– акустическая 18
– влияющая 19
– магнитная 18
– механическая 18
– переменная 20
– постоянная 20
– пространственно-временная 18
– световая 18
– тепловая 18
– электрическая 18
Вероятность доверительная 27, 89
Взаимозаменяемость 433
Волна бегущая 263, 375
– смешанная 375
– стоячая 376
Волновод 378
Вольтметр
– аналоговый 189, 190
– с двойным интегрированием 205
– интегрирующий 200
– кодоимпульсный 200
– переменного тока 190
– постоянного тока 190
– универсальный 190
– с времяимпульсным преобразователем 202
– цифровой 197
Временной селектор 281

Гальванометр 183
 Генератор высоких частот 223
 – волноводный 232
 – газоразрядный 232
 – гармонических колебаний 218
 – звуковых частот 221
 – измерительный 215
 – импульсный 229
 – инфранизких частот 223
 – качающейся частоты 227
 – кварцевый 219
 – линейно изменяющегося
 напряжения 203
 – LC 218
 – на биениях 222
 – на ЛПД 233
 – RC 218, 219
 – сверхвысоких частот 224
 – счетных импульсов 394
 – тактовых импульсов 209
 – частотных меток 374
 – шумовых сигналов 231
 – шумоподобного сигнала 234
 – цифровой 225
 Гистограмма 346
 Градуировка 28
 Граница доверительная 114
 – общая 116
 – погрешностей 116, 117, 127

 Датчик 42
 Двухполюсник 352
 Девиация частоты 148
 Детектор амплитудный 191
 – на ОУ 195
 – средневыпрямленного значения 195
 – среднего квадратического значе-
 ния 195
 – фазовый
 – цифровой
 Децибел 34
 Дешифратор 161, 164
 Диаграмма Вольперта-Смитта
 – Найквиста
 Диапазон 47
 – измерений 47
 – показаний 47

– частотный 215
 Диод Ганна 228
 Дискретизация 152
 Дисперсия 78, 88, 390, 391
 Дисплей 209
 Добротность 353, 359

Единица емкости 40
 – индуктивности 40
 – – дольная 19
 – физической величины 20, 58
 – – кратная 24, 25
 – – основная 58
 – – производная 58
 – частоты 40
 – ЭДС и электрического
 напряжения 39
 Единица Международной системы
 СИ 21
 – дополнительная 22
 – основная 22
 – производная 23

Закон распределения
 – Гаусса (нормальный) 78, 110
 – погрешностей 77
 – равномерный 78, 85
 – Симпсона 78, 86
 – Стюдента 78, 85
 – трапецидальный 78
 – треугольный 78, 86

Значение
 – амплитудное 19
 – среднее квадратическое 19
 – измеренное 19
 – истинное 19
 – мгновенное 18
 – средневыпрямленное значение 18
 – физической величины 18
 – действительное 19
 – истинное 17
 – числовое 18
 – энтропийное 101

Измерение 7, 25
 – абсолютное 33
 – алгоритм 25, 28

- аналоговые 36
- виды 30
- время 47
- достоверность 26, 27, 28
- косвенные 32, 123, 124, 128
- метод 25, 28, 35
- методика 28
- многократные 37
- нелинейные косвенные 32
- неравноточные 38
- объект 25, 28
- однократные 37, 118
- относительные 33
- параметров 386
- правильность 26, 27
- принципы 25, 28
- прямые 31, 105, 118
- равноточные 37, 105
- режим динамический 37
 - – статический 37
- результата 32
 - – воспроизводимость 27
 - – сходимости 27
- совместные 33, 130
- совокупные 32
- средства 25, 38, 40, 41, 59, 93, 99
- условия 19
- цифровые 36
- шкала 25, 28, 29
- Измеритель
 - АЧХ 371
 - лазерного излучения 325
 - микропроцессорный 339
 - нелинейных искажений 350

Интеграл вероятностей 79

- Эйлера 82
- Интегратор 390
- Интервал времени 274
 - доверительный 89, 114
 - корреляции 402
- Интерфейс 415, 425
- Информация 26
 - активная 26
 - априорная 26
 - количество 26
 - измерительная 26, 43

- пассивная 26
- Испытание 29
 - объекта 29
 - результат 30
 - условия 29
 - цель 30
- Источник напряжения 395
 - газоразрядный 232
 - теплового шума 232

Квантиль 90

- нормального распределения 112
- Квалиметрия 12
- Квантование 153
- Класс точности 93
- Клистрон 224, 228
- Код 161
 - двоично-десятичный 162
 - двоичный 161
 - десятичный 161
 - тетрадно-десятичный 162
 - цифровой 346
- Кодирование 154
- Компаратор 170
- Компенсатор 189
- Комплекс измерительно-вычислительный 416
- Консенсус 433
- Контроль 30
- Коррелограмма 400
- Коррелограф 400
- Коррелометр 400
 - знаковый 406
 - многоканальный цифровой 402, 404
 - с аппроксимацией 403
 - – перемножением 403
- Коэффициент
 - нелинейных искажений 255
 - волны бегущей 376
 - – отраженной 376
 - – падающей 376
 - – стоячей 376
 - – комплексный 375
- Стюдента 84
- трансформации масштаба времени 265
- Критерий устойчивости
 - составной 111

– «трех сигм» 110

Куметр 362

Лазерное излучение 324

Линия измерительная 377

Лиссажу фигуры 267

Логометр 355

Математическое обеспечение 413

Математическое ожидание 88, 389

Меандр 117

Мера 26, 41, 62

– многозначная 41

– однозначная 41

Метод амперметра 354

– анализ знаков 76

– введения поправок 74

– вольтметра 354

– графический 76

– дискретного счета 280, 363

– дифференциальный 36

– замещения 36, 72

– измерения 25, 28, 35

– – мощности 316

– – – калориметрический 320

– – – терморезисторный 316

– – частоты 275

– – – гетеродинный 275, 277

– – – заряда и разряда конденсатора 279

– – – резонансный 19275, 276

– – – цифровой 276, 280

– – интервалов времени 284

– интерполяции 287

– компенсации по знаку 73

– компенсационный 36, 187, 229

– мостовой 36, 357

– наименьших квадратов 130

– непосредственной оценки 35, 275

– нониусный 288

– нулевой 36

– преобразования фазового сдвига во
временной интервал 300

– противопоставления 73

– прямой

– развертки круговой 297

– – линейной 394

– – синусоидальной 217

– рандомизации 74

– резонансный 361

– симметричных наблюдений 75

– сравнения 275

– стандартизации 448

– – агрегатирование 448

– – симплификация 448

– – типизация 448

– – унификация 448

– уравнивающий 363

– фильтрации 407

– четырехквadrантный 314

– эллипса 294

Методика 28

Метрология 9, 11

– законодательная 11, 13

– научная 11

– прикладная 11, 13

Микрокалориметр 324

– вакуумный 324

– жидкостный 325

Микропроцессор 208, 243, 369

Модуляция 146

Момент 78

– начальный 88

– центральный 88

Мост измерительный 357

– переменного тока 357, 368

– постоянного тока 358, 368

– уравновешенный 359, 367, 368

– четырехплечий 357

– шестиплечий 357

Мощность 312

– активная 312

– импульсная 243

– переменного тока 313

– поглощаемая 316

– проходящая 316

М-последовательность 236

Мультиметр 208

Наблюдение измерительное 37

Надзор 456

Неопределенность измерения 135

Нормирование погрешностей средств
измерений 71

Нуль-индикатор 357

- Образец стандартный 56
- Обеспечение программное 414
 - информационное 414
- Объект измерения 25
 - стандартизации 430
- Объем выборки 108
- Омметр 356
- Осциллограф
 - двухканальный 257
 - двухлучевой 258
 - запоминающий 245, 259, 261
 - скоростной 245, 263
 - специальный 246
 - стробоскопический 245, 263
 - универсальный 245, 246
 - цифровой 261, 269
 - электронно-лучевой 244
- Ответитель направленный 321
- Охрана здоровья 433
 - окружающей среды 433
- Оценивание 17
 - погрешностей 119
- Оценка выборочная 390
 - квантильная 90
 - погрешности 66
 - результата измерения 106
 - точечная 89
- Панель матричная 260
- Параметр физический 18, 20
- Период 274
- Плата сбора данных 420
- Поверка 30
- Погрешность 19
 - абсолютная 66, 125
 - аддитивная 94
 - внешняя 70
 - грубая (промах) 68, 69, 107
 - динамическая 70
 - дискретизации 282
 - дополнительная 71, 93, 97
 - измерения 19, 26, 27, 65, 124, 128
 - измерительного прибора 48
 - инструментальная 70, 93
 - квантования 99
 - методическая 69
 - мультипликативная 94
 - основная 70, 93, 95
 - относительная 67, 96
 - предельная 67
 - приведенная 68, 96
 - систематическая 51, 68, 116
 - случайная 51, 68, 114, 127
 - статическая 70
 - субъективная 70
 - средств измерения 66, 93
- Полоса пропускания 370
- Помеха 140
- Преобразователь 164, 167
 - аналоговый 42
 - аналого-цифровой 43, 152, 172
 - измерительный 42
 - масштабный 42
 - первичный 42
 - промежуточный 42
 - тока в напряжение 213
 - цифроаналоговый 43, 153, 171
- Прибор 44
 - аналоговый 44
 - виртуальный 417, 420
 - выпрямительный 185
 - измерительный 43, 45
 - интегрирующий 45
 - магнитоэлектрический 185
 - печатающий 43
 - показывающий 43
 - регистрирующий 43
 - самопишущий 43
 - суммирующий 45
 - цифровой 44, 363, 369
 - электромеханический 180
- Принцип 25
 - аппроксимации 225
 - дуальности 225
- Процесс случайный 388
 - стационарный 388
 - эргодический 389
- Развертка осциллографа 248
 - автоколебательная 250, 251
 - ждущая 250, 252
 - калиброванная 266
 - круговая 253, 275
 - линейная 250

- однократная 250
- синусоидальная 252
- стробоскопическая 264
- Резонатор 276
- бикоаксиальный 379
- Результат 26
- измерения 106, 117, 134
- Рефлектометр 379
- Ряды предпочтительных чисел 445, 447
- Самовозбуждение 216
- Самокалибровка 338
- Свойство 15
- СВЧ-генератор 374
- СВЧ-тракт 352, 375
- СВЧ-устройства 375
- Селектор амплитудный 395
- Сертификат 461
- Сертификация 461
- добровольная 463, 469, 471
- обязательная 463, 464, 470
- соответствия 461
- средств измерений 474
- Сетка частот
- Сигнал 14, 15, 137
- амплитудно-модулированный 147
- аналоговый 138
- детерминированный 139, 387
- дискретный 138
- импульсивный 143
- линейный 146
- мультипликативный 344
- модулирующий 146
- находящийся в квадратуре 293
- периодический 141
- противофазный 293
- синфазный 293
- случайный 139
- цифровой 138
- Синтезатор частоты кварцевый 241
- Система гибкая измерительная 411
- единиц физических величин 20, 21
- измерительная 48, 411
- – интеллектуальная 424
- – прямая 411
- измерительно-вычислительная 411
- интерфейсная 346, 347
- информационно-измерительная 32, 411
- классификации 411
- компьютерно-измерительная 41, 417
- магнитоэлектрическая 181
- микропроцессорная 228, 346
- стандартизации Государственная 429
- счисления 161
- термоэлектрическая 187
- централизованная 418
- электродинамическая 181, 184
- электромагнитная 181, 183
- электростатическая 181, 184
- Сквозность 142
- Случайный процесс 386
- стационарный 388
- центрированный 388
- эргодичный 388, 389
- Совместимость 433
- Спектр 143
- Спектральная плотность 145
- Среднее квадратическое отклонение 78, 106, 390
- Стандарт 428, 430
- взаимоувязанный 432
- вид 435, 438
- государственный 30431, 435
- дата введения в действие 433
- идентичный 432
- категория 435
- комплекс 432
- конструкции и размеров 439
- марок 440
- межгосударственный 430
- международный 430
- методов испытаний 440
- на методы контроля 438
- – и средства поверки приборов 441
- – продукцию и услуги 438
- – работы и процессы 438
- научно-технического и инженерного общества 431
- национальный 431
- необходимость взаимной увязки 443
- общих технических условий 439
- основополагающий 432, 438

- отраслевой 431, 436
- пользователь 433
- правил маркировки, упаковки, хранения и транспортировки 440
- приемки 440
- эксплуатации и ремонта 441
- предприятий 431, 437
- применение 433
- прогрессивность и оптимальность 443
- региональный 430
- сопоставимый 432
- сортамента 440
- технических требований 439
- технических условий 439
- типов и основных параметров 439
- типовых технологических процессов 411
- унифицированный 432
- частот 240
- Стандартизация 429
- аспект 433
- в радиоэлектронике 457
- государственная система 437
- задача 433, 434
- комплексная 432
- международная 432
- метод 442, 448
- агрегатирования 448
- программно-целевой 449
- симплификации 448
- типизации 448
- унификации 448
- местная 432
- национальная 432
- нормативный документ 430
- область 433
- объект 430
- опережающая 432
- организации работ 454
- по достигнутому уровню 432
- принцип 442
- взаимозаменяемости 443
- комплексности 443
- модульное формирование техники 449
- научного подхода 442
- предпочтительности 443
- прогрессивности и оптимальности 443
- расчленения 449
- системного подхода 442
- целенаправленность 442
- программа 432
- региональная 432
- цель 433
- Строб-импульс 265, 281
- Схема вычитания 397
- поверочная 59, 60
- Счетчик импульсов 160
- интегральный 160
- реверсивный 286
- Тангенс угла потерь 270361
- Теорема Винера–Хинчина 407
- Ляпунова 82
- Котельникова 152, 339
- Умова–Пойтинга 322
- Тераомметр 357
- Термистор 317
- Терморезистор 316
- Термопара 319
- Тестер 45
- Технические условия 433
- Точность измерений 26, 67
- Триггер 157
- Шмитта 171
- Уровень значимости 89
- Усилитель операционный 167
- промежуточной частоты 231
- Условия равновесия моста 361
- баланса амплитуд 217
- фаз 217
- Установка измерительная 48
- Устройство входное 396
- регистрирующее 403
- сравнения 41
- управления 365
- усредняющее 396
- формирующее 396
- центрирующее 393
- цифровое отсчетное 393
- программируемое 241

Фаза 292

Фазовый сдвиг 292

- детектор 310

Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты 308

- микропроцессорный 306
- среднего значения 304
- с умножением частоты 309
- цифровой 302

Фильтр аналоговый 347

- синтезирующий 347
- цифровой 346
- – линейный 347
- – нерекурсивный 347
- – рекурсивный 349

Функция автокорреляционная 400

- взаимокорреляционная 402
- гамма 82
- дельта 144
- единичная 145
- интегральная 388, 395
- корреляции 400, 403
- Лапласа 80
- распределения 387
- Уолша 236

Фурье преобразование 143, 330

- – быстрое 339
- – дискретное 339
- – обратное 143
- – прямое 143, 331, 332
- ряд 142, 313

Характеристика амплитудно-частотная 370

- фазо-частотная 370

Холла пластинка 322

- преобразователь 322
- эффект 322

Цена деления 28

Цепи с параметрами

- распределенными 352
- сосредоточенными 352

Цифровое отсчетное устройство 302

- круговая (угловая) 273

- резонансная 218

- циклическая 273, 371

Частотомер 274, 365

- резонансный 276

Четырехполосник 352, 370

- Чувствительность 47

Шаг 361

- дискретной сетки 241
- квантования 156
- считывания 265

Шина 215

Шифратор 161, 163

Шкала абсолютная 28

- интервалов 29
- наименований 29
- натуральная 29
- отношений 29
- физической величины 28

Шум 140

- белый 231

Щелевая секция 378

Электронно-лучевая трубка 246, 253

Элемент логический 154

Энтропия условная 99

Эталон 49

- вторичный 51
- государственный 50, 51
- единиц времени и частоты 54
- – электрических величин 53
- единицы индуктивности 55
- – силы электрического тока 55
- – электрического сопротивления 55
- – электрической емкости 55
- – ЭДС и напряжения 54
- копия 51
- международный 51
- первичный 50
- рабочий 52
- свидетель 51
- специальный 50
- сравнения 52

Частота 273

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА	5
ВВЕДЕНИЕ	7
ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ	14
Глава 1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ	14
1.1. Общие сведения	14
1.2. Физические величины	16
1.3. Международная система единиц	20
1.4. Основные метрологические термины и понятия	25
1.5. Классификация измерений	30
1.6. Средства измерений	38
1.7. Эталоны единиц электрических величин	49
1.8. Государственная система обеспечения единства измерений	57
Контрольные вопросы	63
Глава 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ	65
2.1. Общие сведения	65
2.2. Погрешности измерений и их классификация	66
2.3. Систематические погрешности	71
2.4. Случайные погрешности	76
2.5. Правила и формы представления результатов измерений	91
2.6. Нормирование метрологических характеристик средств измерений	92
2.7. Информационные характеристики средств измерений	99
Контрольные вопросы	102
Глава 3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	104
3.1. Общие сведения	104
3.2. Прямые измерения с многократными наблюдениями	105
3.3. Прямые однократные измерения	118
3.4. Косвенные измерения	123
3.5. Совместные измерения	130
3.6. Погрешность и неопределенность результата измерения	134
Контрольные вопросы	136

ЧАСТЬ II. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН 137

Глава 4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ. ИМПУЛЬСНАЯ И ЦИФРОВАЯ ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ	137
4.1. Общие сведения об измерительных сигналах	137
4.2. Математическое описание измерительных сигналов	141
4.3. Сигналы с импульсной и импульсно-кодовой модуляцией	149
4.4. Основные сведения об импульсной и цифровой технике измерений	152
4.5. Логические и цифровые элементы	154
4.6. Цифровые измерительные приборы и преобразователи	164
4.7. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи	167
Контрольные вопросы	174
Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СИЛЫ ТОКА	176
5.1. Общие сведения	176
5.2. Основные типы приборов, измеряющих напряжение и силу тока	180
5.3. Компенсаторы постоянного тока	187
5.4. Аналоговые электронные вольтметры	189
5.5. Цифровые вольтметры	197
5.6. Техника измерения напряжения	209
5.7. Особенности измерения силы токов	212
Контрольные вопросы	214
Глава 6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ	215
6.1. Общие сведения	215
6.2. Генераторы гармонических колебаний	218
6.3. Цифровые измерительные генераторы низких частот	225
6.4. Генераторы качающейся частоты и сигналов специальной формы	227
6.5. Генераторы шумовых сигналов	231
6.6. Генераторы шумоподобных сигналов	234
6.7. Стандарты и синтезаторы частоты	240
Контрольные вопросы	243
Глава 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СИГНАЛОВ	244
7.1. Общие сведения	244
7.2. Универсальные осциллографы	246
7.3. Запоминающие осциллографы	259
7.4. Скоростные и стробоскопические осциллографы	262
7.5. Осциллографирование непрерывных и импульсных сигналов	265
7.6. Цифровые осциллографы	269
Контрольные вопросы	272
Глава 8. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ	273
8.1. Общие сведения	273
8.2. Резонансный метод измерения частоты	276
8.3. Гетеродинный метод измерения частоты	277
8.4. Измерение частоты методом заряда и разряда конденсатора	279
8.5. Цифровой метод измерения частоты	280

8.6. Цифровой метод измерения интервалов времени	284
8.7. Автоматизация процессов измерения частоты и интервалов времени	289
Контрольные вопросы	291
Глава 9. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА	292
9.1. Общие сведения	292
9.2. Осциллографический метод	293
9.3. Компенсационный метод	299
9.4. Метод преобразования фазового сдвига во временной интервал	300
9.5. Цифровые методы измерения фазового сдвига	302
9.6. Методы измерения фазового сдвига с преобразованием частоты	308
9.7. Измерение фазового сдвига фазовыми детекторами	310
Контрольные вопросы	311
Глава 10. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ	312
10.1. Общие сведения	312
10.2. Измерение мощности в диапазонах низких и высоких частот	313
10.3. Измерение мощности СВЧ-колебаний	315
10.4. Измерение мощности лазерного излучения	324
10.5. Цифровые ваттметры	327
Контрольные вопросы	329
Глава 11. АНАЛИЗ СПЕКТРА СИГНАЛОВ	330
11.1. Общие сведения	330
11.2. Параллельный анализ спектра	333
11.3. Последовательный анализ спектра	334
11.4. Цифровой анализ спектра	338
11.5. Анализаторы спектра на цифровых фильтрах	346
11.6. Измерение нелинейных искажений	348
Контрольные вопросы	351
Глава 12. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ	352
12.1. Общие сведения	352
12.2. Измерение активных сопротивлений	354
12.3. Мостовые измерители параметров элементов	357
12.4. Резонансные методы измерения параметров элементов	361
12.5. Цифровые приборы для измерения параметров элементов	363
12.6. Измерение амплитудно-частотных характеристик	370
12.7. Измерение параметров линейных СВЧ-устройств	374
Контрольные вопросы	385
Глава 13. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ	386
13.1. Общие сведения	386
13.2. Измерение математического ожидания и дисперсии	390
13.3. Измерение распределения вероятностей	395
13.4. Измерение корреляционных функций	400
13.5. Спектральный анализ случайных процессов	406
Контрольные вопросы	408

Глава 14. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ	409
14.1. Общие сведения	409
14.2. Автономные многофункциональные цифровые приборы	410
14.3. Измерительные системы	411
14.4. Компьютерно-измерительные системы	417
14.5. Виртуальные приборы	420
14.6. Интеллектуальные измерительные системы	424
14.7. Стандартные интерфейсы	425
Контрольные вопросы	427
ЧАСТЬ III. ОСНОВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ И СЕРТИФИКАЦИИ	428
Глава 15. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА СТАНДАРТИЗАЦИИ	428
15.1. Общие сведения	428
15.2. Цели и задачи стандартизации	433
15.3. Категории и виды стандартов Российской Федерации	435
15.4. Основные принципы и методы стандартизации	442
15.5. Государственные и отраслевые системы стандартов на общетехнические нормы и требования	450
15.6. Организация работ по стандартизации. Государственный надзор за соблюдением стандартов	454
15.7. Основные вопросы стандартизации в радиоэлектронике	457
15.8. Международное сотрудничество в сфере стандартизации	459
Контрольные вопросы	460
Глава 16. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ	461
16.1. Общие сведения	461
16.2. Организационная база сертификации	462
16.3. Объекты сертификации	470
16.4. Сертификация средств измерений	474
Контрольные вопросы	476
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	477
ПРИЛОЖЕНИЯ	478
ЛИТЕРАТУРА	514
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	515

Учебное издание

**Нефедов Виктор Иванович,
Хазин Владимир Иванович,
Битюков Владимир Ксенофонтович,
Федорова Елена Владимировна,
Белянина Елизавета Константиновна**

МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

**Редактор Е.Н. Рожкова
Художник А.А. Лукьяненко
Художественный редактор Е.А. Вишнякова
Корректор В.А. Жилкина**

Лицензия ИД № 06236 от 09.11.01.

Изд. № РЕНТ-128. Подп. в печать 19.05.03. Формат 60×88¹/₁₆. Бум. газетная.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Объем 32,84 усл. печ. л., 32,84 усл. кр.-отт.,
31,14 уч.-изд. л. Тираж 5000 экз. Заказ № Я-362.

**ФГУП «Издательство «Высшая школа», 127994, Москва, ГСП-4,
Неглинная ул., 29/14.**

**Тел.: (095) 200-04-56.
E-mail: info@v-shkola.ru <http://www.v-shkola.ru>**

**Отдел реализации: (095) 200-07-69, 200-59-39, факс: (095) 200-03-01.
E-mail: sales@v-shkola.ru**

**Отдел «книга-почтой»: (095) 200-33-36.
E-mail: bookpost@v-shkola.ru**

**Отпечатано в типографии ГУП ПИК «Идел-Пресс».
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.**

Издательство "Высшая школа"

Адрес издательства: 127994, г. Москва, ул. Неглинная, 29/14

Тел.: (095) 200-04-56

E-mail: info@v-shkola.ru

<http://www.v-shkola.ru>

Отдел реализации: (095) 200-07-69, 200-59-39

факс: (095) 200-03-01

E-mail: sales@v-shkola.ru

Отдел «книга-почтой»: (095) 200-33-36

E-mail: bookpost@v-shkola.ru

Отдел рекламы: (095) 200-33-70, факс: (095) 200-06-87

E-mail: reklama@v-shkola.ru

Телефон магазина: (095) 200-30-14

Схема проезда



Проезд:

до станции м. "Цветной бульвар", "Пушкинская",
"Тверская", "Кузнецкий мост".

Вход в издательство со стороны Петровского бульвара.