

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Ю. Б. ОРЛОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО КУРСУ  
«ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ»



Владимир 2018

УДК 621.317  
ББК 31.221+32.842  
О-66

Рецензенты:

Кандидат педагогических наук, доцент  
директор муниципального автономного общеобразовательного  
учреждения г. Владимира «Промышленно-коммерческий лицей»  
*В. Е. Емельянов*

Доктор физико-математических наук, доцент  
зав. кафедрой общей и теоретической физики  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*А. В. Малеев*

Издаётся по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Орлов, Ю. Б.**

О-66      Лабораторный практикум по курсу «Электрорадиоизмерения» / Ю. Б. Орлов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2018. – 152 с.  
ISBN 978-5-9984-1014-7

Систематически излагаются основные методы и способы измерений частоты, модуляции, напряжения, фазового сдвига, параметров линейных и нелинейных элементов, а также приводятся сведения о принципах работы необходимых для этих измерений приборов. Изложены материалы и задания по восьми лабораторным работам.

Предназначен для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 44.03.05 – Педагогическое образование по профилям «Технология», «Экономическое образование».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 7. Ил. 65. Библиогр.: 25 назв.

УДК 621.317  
ББК 31.221+32.842

ISBN 978-5-9984-1014-7

© ВлГУ, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях любой человек не может активно содействовать совершенствованию технологических процессов без достаточно глубоких знаний основ электротехники, радиоэлектроники и микроэлектроники. В связи с этим в учебных планах высших учебных заведений предусмотрен курс электротехники, радиоэлектроники и микроэлектроники, при изучении которого немаловажное значение имеет лабораторный практикум, так как выполнение лабораторных работ способствует более глубокому усвоению основных теоретических положений изучаемых электротехнических и электронных устройств.

В процессе выполнения лабораторных работ создаются определенные условия для получения студентами необходимых навыков в пользовании разнообразными измерительными приборами и электрооборудованием.

При работе в лаборатории электротехники и радиоэлектроники во избежание несчастных случаев, а также преждевременного выхода из строя приборов и электрооборудования студент при выполнении лабораторных работ должен строго выполнять следующие правила:

1. Приступая к работе, студент должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.

2. При работе в лаборатории категорически запрещается приносить с собой вещи и предметы, загромождающие рабочие места, способствующие созданию условий, которые могут привести к нарушению правил техники безопасности.

3. В лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочие места и переходить от одной работы к другой.

4. Лабораторная работа, пропущенная студентом, выполняется по разрешению преподавателя и особому расписанию.

5. Сборку электрической цепи производят в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме, обеспечивая при этом надежность электрических контактов всех разъемных соединений.

6. При сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались петлями. Приборы и электрооборудование расставляют так, чтобы было удобно ими пользоваться.

7. Собранную электрическую цепь представляют для проверки преподавателю.

8. Включение электрической цепи под напряжением (после проверки) производят только с разрешения и в присутствии преподавателя.

9. Переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания.

10. Запрещается прикасаться пальцами, карандашами и другими предметами к оголенным токоведущим частям электрической цепи, находящимся под напряжением.

11. При работе с конденсаторами следует помнить, что на их зажимах, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, способный быть причиной поражения электрическим током.

12. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

### **Подготовка к практикуму**

Лабораторные работы в группах проводят в соответствии с расписанием учебных занятий в институте и в течение определенного времени, поэтому для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

1) предварительно ознакомиться с расписанием выполнения лабораторных работ;

2) внимательно изучить описание соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоят основная цель и задачи;

3) приступая к работе, необходимо изучить теорию, относящуюся к данной лабораторной работе;

4) до проведения лабораторной работы подготовить в отчете соответствующие схемы, миллиметровки для построения графиков, таблицы наблюдений и расчетные формулы;

5) не подготовленные к работе студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются.

## **ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРАКТИКУМА**

1. Перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием, а также измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы.

2. Сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Целесообразно вначале соединить все элементы цепи, включаемые последовательно, а затем параллельно.

3. После окончания сборки электрическую цепь необходимо предъявить для проверки. Включать цепь под напряжением можно только с разрешения преподавателя.

4. Запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и точно.

5. Результаты измерений студент заносит в свой отчёт.

6. После выполнения отдельного этапа лабораторной работы результаты опыта вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляют до разборки электрической цепи для проверки преподавателем.

7. Разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой можно только по разрешению преподавателя.

8. После окончания работы в лаборатории рабочее место следует привести в порядок.

9. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

## Лабораторная работа № 1

# УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

**Цель работы:** ознакомиться с устройством и принципом действия универсального электронно-лучевого осциллографа и освоить практические навыки по измерению параметров сигналов.

### **Оборудование:**

1. Двухлучевой четырехканальный универсальный электронно-лучевой осциллограф С1-17.
2. Генератор сигналов синусоидальной формы ГЗ-35.

### **Теоретическая часть**

Класс приборов, позволяющих исследовать форму сигнала, очень обширен. К ним можно отнести и электромеханические осциллографы (так называемые «шлейфовые»), и разного рода самописцы, и большую группу приборов с электронно-лучевой трубкой – электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО). Последним и посвящен настоящий раздел.

*Электронно-лучевой осциллограф* – один из наиболее универсальных измерительных приборов для визуального наблюдения электрических сигналов и измерения их параметров. Разработаны и используются на практике различные типы электронно-лучевых осциллографов: универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие и специальные. Возможность наблюдения формы исследуемого сигнала и одновременное измерение его параметров выдвигают электронно-лучевой осциллограф в разряд универсальных приборов.

По числу одновременно наблюдаемых на экране сигналов различают одноканальные и многоканальные осциллографы. Изображения нескольких входных сигналов совмещают на экране или с помощью специальной многолучевой трубки, или путем периодического переключения осциллографа на разные входы с помощью электронного коммутатора.

*Универсальным осциллографом* называют измерительный прибор, в котором исследуемый электрический сигнал подается через канал вертикального отклонения на вертикально отклоняющую систему электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), а горизонтальное отклонение

электронного луча трубки осуществляется напряжением горизонтальной развертки (ГОСТ 22737-77).

Упрощенная структурная схема универсального осциллографа изображена на рис. 1.1. В осциллографе кроме ЭЛТ и каналов вертикального и горизонтального отклонений можно выделить следующие функциональные блоки: устройство синхронизации и запуска развертки, канал модуляции луча, вспомогательные устройства, источник питания.

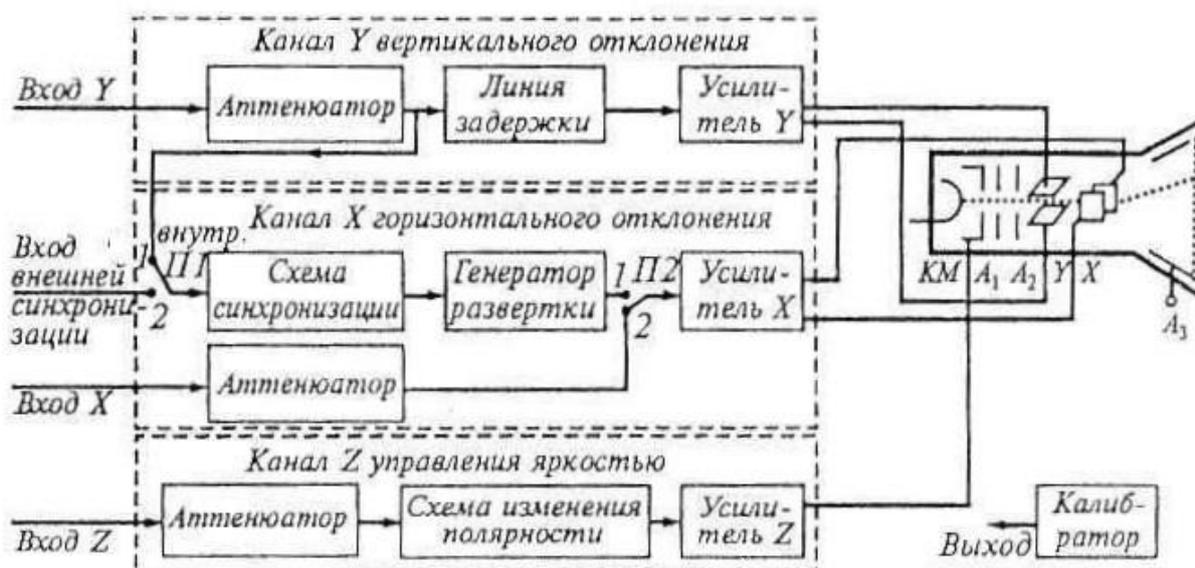


Рис. 1.1. Упрощенная структурная схема универсального осциллографа

В стеклянном баллоне ЭЛТ расположены подогреваемый катод  $K$ , модулятор (сетка)  $M$ , фокусирующий анод  $A_1$ , ускоряющий анод  $\Pi 2$  и две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин:  $X$  – горизонтальные,  $Y$  – вертикальные.

*Канал вертикального отклонения луча.* На рис. 1.1 показан канал вертикального отклонения луча, состоящий из аттенюатора, линии задержки и усилителя. Канал  $Y$  служит для передачи на пластины  $Y$  исследуемого сигнала  $U_c(t)$ , подводимого к входу  $Y$ . Аттенюатор канала позволяет ослабить сигнал  $U_c(t)$  в определенное число раз, а линия задержки (регулируемая) – обеспечить его подачу на пластины  $Y$  с задержкой относительно начала горизонтально развертывающего напряжения  $U_x$ . Усилитель обеспечивает амплитуду 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 включает следующие звенья: входной усилитель с изменяемым коэффициентом усиления  $K_{yc}$ , линию задержки и парафазный (с противофазными выходными сигналами) усилитель, обеспечивающий положение светового пятна в центре экрана при отсутствии исследуемых сигналов. В канал вертикального отклонения луча может также входить калибратор амплитуды (на рис. 1.1 не показан). Сигнал от калибратора поступает на вход первого усилителя для установки заданного коэффициента усиления  $K_{yc}$ . При этом цена деления (В/дел) масштабной сетки на экране осциллографа определится формулой

$$C = \left| \frac{U_k}{K_{yc} N_k} \right|,$$

где  $U_k$  – напряжение калибратора;  $K_{yc}$  – коэффициент усиления усилителя при одном положении регулировки;  $N_k$  – число делений сетки, занятое изображением калибровочного сигнала.

Цена деления масштабной сетки вычисляется с учетом коэффициента деления  $K_d$  аттенюатора  $C_d - C_{kd}$ . Если в процессе работы параметр  $c$  остается постоянным, то величину  $C_d$  можно указать на дискретном переключателе аттенюатора, что и делают на практике.

*Канал горизонтального отклонения луча* – канал  $X$  – 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 ко входу  $X$  осциллографа. Схема синхронизации вырабатывает сигнал синхронизации, поступающий на генератор развертки (для получения четкой неподвижной осциллограммы). Усилитель канала  $X$  усиливает и преобразует сигнал развертки  $U_p$  в  $U_x$ .

Основной блок в канале – генератор развертки, работающий в непрерывном или ждущем режиме. К форме пилообразного напряжения генератора предъявляют ряд требований:

- время обратного хода луча должно быть много меньше времени прямого хода  $T_{обр} \ll T_{пр}$ . В противном случае часть изображения сигнала будет отсутствовать;

- для того чтобы изображение на экране было неподвижным, осциллограмма должна начинаться всегда с одной и той же точки экрана и фазы сигнала. Этого достигают синхронизацией напряжения

развертки с напряжением сигнала, поэтому период развертки должен быть равен или кратен периоду исследуемого сигнала:  $T_{\text{разв}} = nT_c$ , где  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ ;

– напряжение развертки при прямом ходе луча должно быть линейным, иначе луч начнет двигаться по экрану с различной скоростью и нарушится равномерность временного масштаба по оси  $X$ . Это может привести к искажению сигнала.

*Канал  $Z$*  (канал управления яркости) осциллографа служит для передачи с входа  $Z$  на управляющий вход ЭЛТ сигнала, модулирующего ток ее луча и, следовательно, яркость свечения. В схему этого канала входят аттенюатор, схема изменения и усилитель  $Z$ .

### ***Виды разверток в осциллографе***

Один из основных блоков осциллографа – электронно-лучевая трубка, выходными элементами которой служат две пары пластин, с помощью специальной развертки отклоняющие луч горизонтально и вертикально.

*Развертка* – это линия, которую чертит луч на экране при отсутствии исследуемого сигнала в результате действия только одного развертывающего напряжения. 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 осциллографа одновременно, то название развертке дают по ее форме (например, круговая или эллиптическая).

Наиболее широко используют линейную развертку, создаваемую пилообразным напряжением  $U_p$  генератора развертки. 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 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 только один раз с последующей блокировкой.

При подаче на горизонтально отклоняющие пластины напряжения  $U_x$  пилообразной формы (рис. 1.2) электронный сфокусированный луч под воздействием этого напряжения перемещается слева направо в 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.

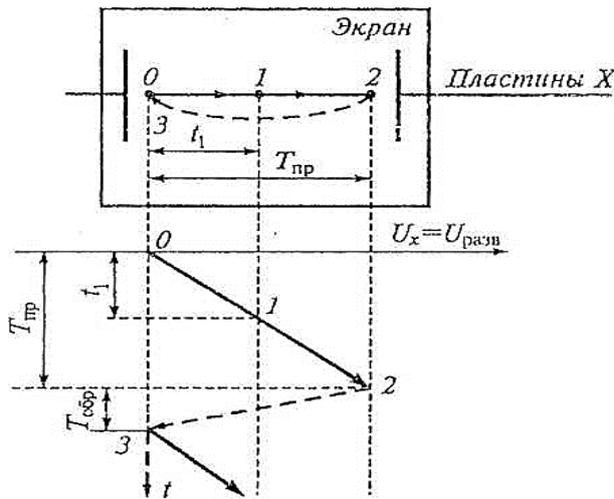


Рис. 1.2. Диаграмма, поясняющая создание временного масштаба по горизонтальной оси экрана: —► – прямой ход луча; - - - - -► – возвратный ход луча

электронно-лучевой трубки осциллографа, на экране можно наблюдать исследуемый сигнал, поступающий на пластины  $Y$  и изменяющийся во времени (развернутый).

Автоколебательную развертку применяют для исследования периодических, а также импульсных сигналов с небольшой скважностью  $Q = T/t$ . Ее используют при внутренней синхронизации. На рис. 1.3 представлены исследуемый сигнал  $U_c$ , развертывающее синхронное напряжение  $U_x$  и наблюдаемая осциллограмма.

Автоколебательная развертка не позволяет наблюдать непериодические сигналы и практически бесполезна при отслеживании периодических импульсных сигналов с большой скважностью  $Q$  (это связано с тем, что передний и задний фронты импульса почти сливаются). В этих случаях используют ждущую развертку.

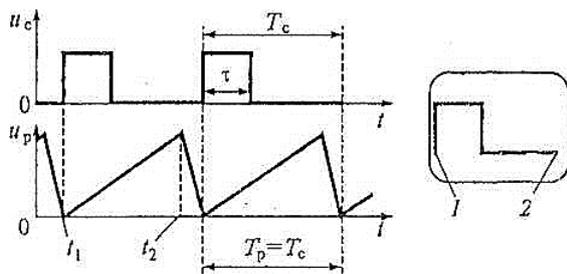


Рис. 1.3. Пример применения автоколебательной развертки

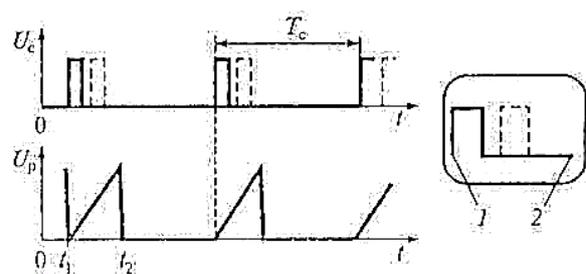


Рис. 1.4. Пример применения ждущей развертки

Пример использования ждущей развертки показан на рис. 1.4. 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.

В осциллографе начало ждущей развертки несколько задержано относительно фронта (переднего скачка) импульса  $U_c$ . Поэтому если фронт импульса очень короткий, то он может не отобразиться на осциллограмме. Для наблюдения короткого фронта сигнал  $U_c$  задерживают во времени в канале  $Y$  с помощью линии задержки (см. штриховые импульсы  $U_c$  на рис. 1.4). Осциллограмма этой развертки дана на рис. 1.4 штриховой линией.

Рассмотрим получение на экране ЭЛТ круговой развертки. Для этого на пластины  $Y$  надо подать синусоидальный сигнал  $U_y = U \sin(\omega t) = U \sin(2\pi t/T)$ , а на пластины  $X$  – аналогичный по форме сигнал, но задержанный по времени на четверть периода (по фазе на  $\varphi = 90^\circ$ ), т. е. сигнал  $U_x = U \sin(\omega(t - T/4)) = U \cos(\omega t)$ . Осциллограмма круговой развертки представлена на рис. 1.5.

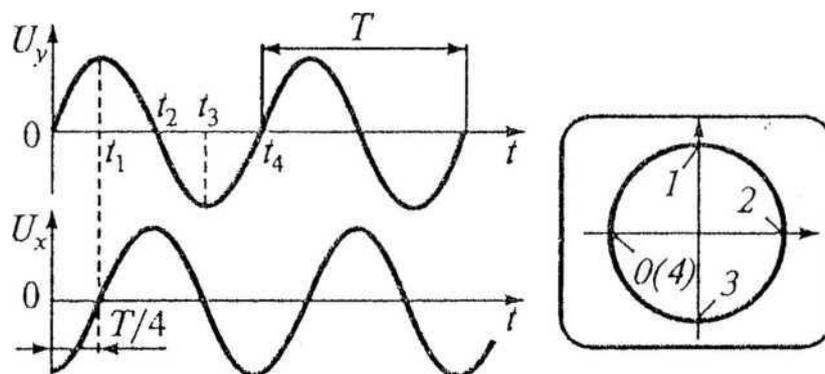


Рис. 1.5. Получение круговой развертки в осциллографе

Под действием напряжений развертки  $U_y$  и  $U_x$  луч прочерчивает на экране окружность за время, равное периоду  $T$ .

Положение луча на экране в момент времени  $t = 0$  отмечено точкой 0, в момент  $t$  – точкой 1 и т. д. Если амплитуды сигналов  $U_y$  и  $U_x$  не равны, то получим эллиптическую развертку, т. е. на экране увидим эллипс.

### **Электронно-лучевая трубка**

Способ получения сфокусированного луча и схему управления лучом можно пояснить с помощью схемы, представленной на рис. 1.6. Как уже отмечалось, простейшая однолучевая трубка представляет

собой вакуумный стеклянный баллон, в котором расположены: подогреваемый катод  $K$ , модулятор (сетка)  $M$ , фокусирующий анод  $A_1$ , ускоряющий анод  $A_2$  и две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин:  $X$  – горизонтальные,  $Y$  – вертикальные. Внутренняя поверхность дна баллона (экран) покрыта люминофором, светящимся под действием бомбардировки электронами. Совокупность электродов  $K, M, A_1, A_2$  называют электронной пушкой, которая излучает узкий пучок электронов. Для этого на электроды подают напряжения, примерные величины которых показаны на рис. 1.6.

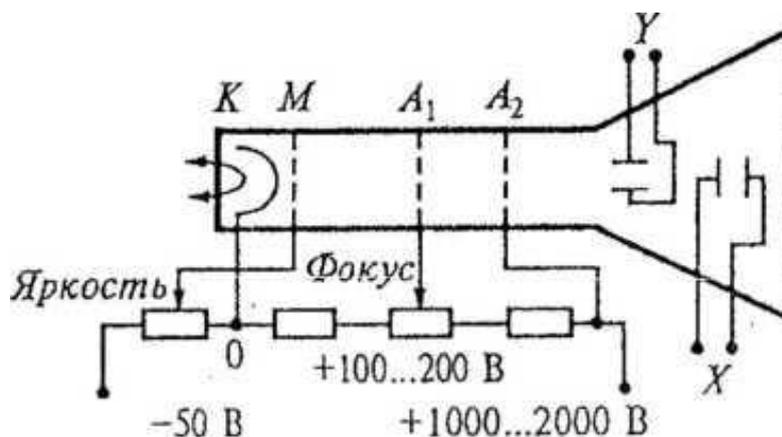


Рис. 1.6. Схема управления лучом ЭЛТ

Электронное облако около нагретого катода под воздействием высокого потенциала ускоряющего анода  $A_2$  ускоряется и устремляется к экрану. Интенсивность луча регулируется потенциалом сетки  $M$ , фокусировка – первым анодом  $A_1$ .

*Основные характеристики электронно-лучевой трубки* – чувствительность, полоса пропускания, длительность послесвечения, площадь экрана.

Чувствительность трубки  $ST = LT/UT$ , где  $LT$  – отклонение луча на экране трубки под воздействием напряжения  $U_t$ , приложенного к паре отклоняющих пластин. Обычно величина  $ST$  составляет порядка 1 мм/В.

С увеличением частоты исследуемого сигнала чувствительность трубки падает. Верхняя граница полосы пропускания ЭЛТ устанавливается на уровне, где чувствительность равна примерно 0,7 от номинального значения. Для универсальных осциллографов широкого использования эта частота достигает 100 МГц. В современных осциллографах часто применяют многолучевые трубки, что достигается уве-

личением 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 улучшения использования площади экрана у современных ЭЛТ экран прямоугольной формы.

К световым параметрам ЭЛТ относят:

– диаметр светового пятна, который при оптимальной яркости определяет разрешающую способность ЭЛТ;

– максимальная яркость свечения экрана, которая зависит от плотности электронного пучка и регулируется путем изменения 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 фотоматериалы более чувствительны;

– время послесвечения – для улучшения визуального восприятия осциллограммы время свечения экрана должно превышать время воздействия на него электронов. Если требуется наблюдать процессы с частотой более 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 продолжительностью более 0,1 с.

Как уже отмечалось, напряжение развертки при прямом ходе луча должно быть линейным, иначе появятся искажения исследуемого сигнала (рис. 1.7).

Нелинейность рабочего участка развертки прямого участка характеризуется коэффициентом нелинейности, физический смысл которого виден из рис. 1.7, б. Коэффициент нелинейности выражает относительное изменение скорости нарастания напряжения в начале и конце рабочего хода развертки. Величина коэффициента нелинейности рабочего участка развертки должна быть не более 1 %.

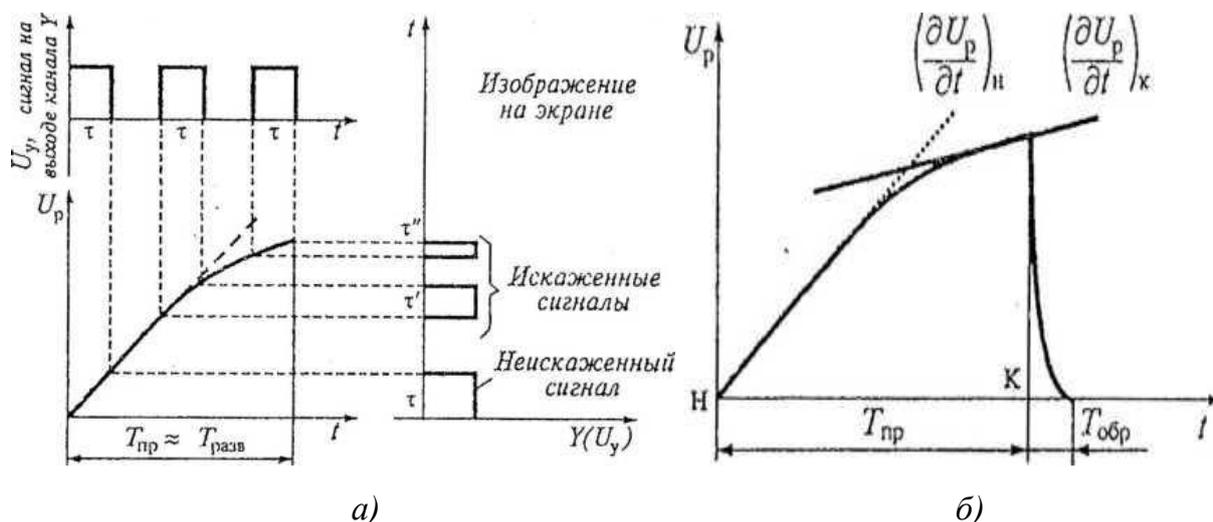


Рис. 1.7. Искажения осциллограммы сигнала: *а* – вследствие нелинейности развертки; *б* – иллюстрация к понятию коэффициента нелинейности:  
 н – начало развертки; к – конец развертки

Основное требование, предъявляемое к каждому измерительному прибору, – минимальная погрешность измерения. При выборе осциллографа следует в первую очередь обратить внимание на его технические характеристики: 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 выполняют автоматически. Ширина луча должна быть минимальной при достаточной яркости. Следует также обращать внимание на входные параметры осциллографа. Так, у некоторых осциллографов входное сопротивление достигает 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 может составить несколько десятков пикофарад. При измерении импульсов и напряжений высоких частот при соединении должны использоваться специальные высокочастотные кабели.

При измерении амплитудных значений напряжения в универсальных осциллографах применяют метод измерения амплитуд сигналов с помощью масштабной сетки, помещенной на экране осциллографа. Цену деления сетки устанавливают заранее с помощью ка-

либратора амплитуды. Иллюстрация данного метода представлена на рис. 1.8, где показаны периодические сигналы.

Параметры импульсов определяют следующим образом:

- Размах или амплитуда импульса  $U_p$ , В:  $U_p = C_y I_y$ , где  $C_y$  – цена деления сетки по вертикали, В/дел;  $I_y$  – количество делений сетки по вертикали, ед.

- Период следования импульсов  $T$ :  $T = C_x L_x$ , где  $C_x$  – цена деления сетки по горизонтали, с/дел;  $L_x$  – количество делений сетки по горизонтали, ед.

- Длительность импульса определяется как  $t = C_x L_x$ , где  $L_x$  – количество делений сетки по горизонтали (в рамках одного импульса).

Погрешность измерения амплитуды сигнала при этом методе измерения составляет 4 – 7 %.

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 осциллографа можно измерять параметры сигналов сложной временной структуры – например, ступенчатых сигналов или сигналов кодовой последовательности. Можно также измерять параметры случайных и переходных процессов. Наиболее прост метод калиброванной развертки (калиброванных меток), который показан на рис. 1.9.

Реальная погрешность этого метода составляет порядка 10 % и зависит от количества меток.

Калибровочные метки известной частоты наносят на изображение сигнала путем модуляции яркости луча, т. е. подачи на сетку ЭЛТ

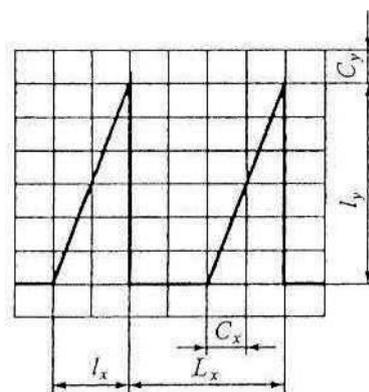


Рис. 1.8. Определение параметров сигнала с помощью масштабной сетки

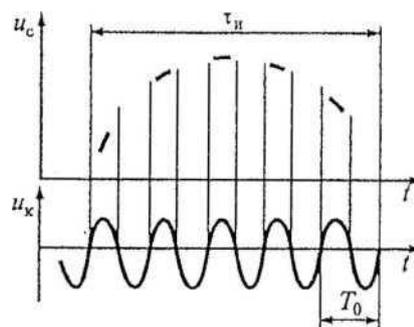


Рис. 1.9. Определение временных интервалов с помощью калиброванных меток:  $U_c$  – напряжение исследуемого сигнала;  $U_k$  – напряжение калибровочного сигнала

напряжения известной частоты  $f_0$ ,  $T_0 = 1 / f_0$ . При этом  $T_{\text{сигн}} = n T_0$ , где  $n$  – количество калибровочных меток.

Существующие способы повышения точности этого метода также используют в цифровых осциллографах. В некоторых случаях это позволяет получить погрешность менее 1 %.

### **Измерение фазового сдвига**

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 текущая (мгновенная) фаза в момент времени  $t$  равна  $\omega(t) = \omega t + \varphi_1$ , где  $\varphi_1$  – начальная фаза.

Фазовым сдвигом  $\varphi$  двух гармонических сигналов одинаковой частоты  $U_1(t) = U_{m1}\sin(\omega t + \varphi_1)$  и  $U_2(t) = U_{m2}\sin(\omega t + \varphi_2)$  называют модуль разности их начальных фаз:  $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$ .

Собственно же величину  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  называют *разностью фаз* сигналов. Фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  не зависит от времени, если остаются неизменными начальные фазы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Отметим, что на практике обычно решают задачу измерения разности фаз двух гармонических (синусоидальных) колебаний с равными частотами. Фазовый сдвиг удобнее представить как зависимость сдвига сигналов во времени  $\Delta t$ , соответствующего их идентичным фазам. Так, например, для синусоидальных сигналов  $U_1(t) = U_{m1}\sin\omega t$  и  $U_2(t) = U_{m2}\sin\omega(t - \Delta t)$ , имеющих одинаковый период  $T = 2\pi/\omega$  сдвиг фазы  $\Delta\varphi = \omega\Delta t = (2\pi \Delta t/T)$  (рис. 1.10):

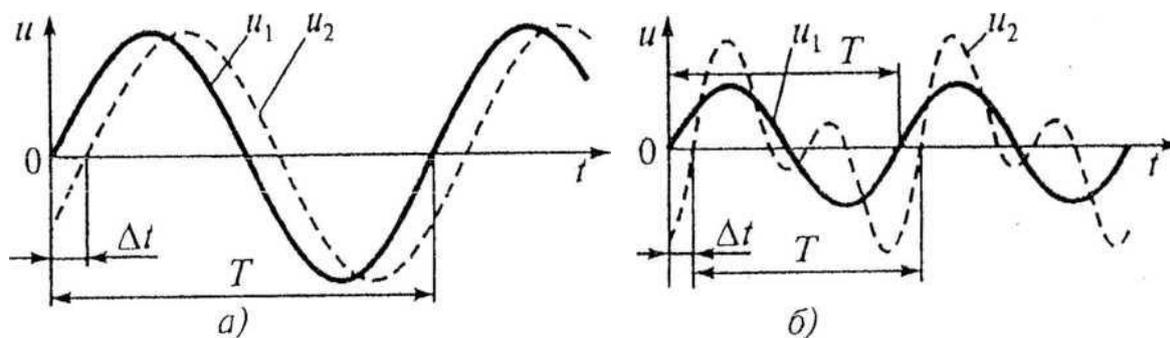


Рис. 1.10. Графики сигналов

Два сигнала называются синфазными, противофазными и находящимися в квадратуре, если фазовый сдвиг между ними равен  $0$ ,  $\pi$  и  $\pi/2$

соответственно. Применительно к периодическим синусоидальному и несинусоидальному сигналам (см. рис. 1.10, б) и двум несинусоидальным сигналам с одинаковым периодом  $T$  используют понятие об их *сдвиге* (задержке) во времени  $\Delta t$ .

Для измерения фазового сдвига с помощью осциллографа применяют методы линейной, синусоидальной и круговой разверток, а также метод полуокружности.

Метод линейной развертки реализуется при наблюдении на экране одновременно двух сигналов (см. рис. 1.10). Для этого можно использовать двухлучевой осциллограф, подавая сигналы на входы вертикального отклонения лучей (входы  $Y$ ). Можно также применить однолучевой осциллограф, если на его вход  $Y$  подавать исследуемые сигналы поочередно через электронный коммутатор. В том и другом вариантах горизонтальные развертки осциллографов должны быть синхронизированы одним из сигналов. Измерив временные отрезки  $\Delta t$  и  $T$ , вычисляют фазовый сдвиг сигналов в радианах или градусах по следующему выражению:

$$\Delta\varphi = 360^\circ \Delta t/T.$$

При данном методе погрешность измерения фазового сдвига  $\Delta\varphi$  близка к  $\pm(5...7)^\circ$  и вызвана нелинейностью развертки, неточностью замера интервалов  $\Delta t$  и  $T$ , а также ошибками определения положения оси времени.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с устройством двухлучевого четырехканального осциллографа С1-17 и генератора ГЗ-35. Обратит внимание, что осциллограф имеет в составе электронно-лучевой трубки два независимых электронных луча, а его предусилители коммутаторы – по два сигнальных входа  $Y$  (электронный коммутатор каждого предусилителя коммутатора переключает управление вертикальным отклонением «своего» луча). Все четыре входа  $Y$  равнозначны. Также обратит внимание, что генератор синусоидальных колебаний ГЗ-35 имеет два парафазных выхода, а один сигнальный кабель (маркировка 75 Q) в выходном штекере содержит фазосдвигающую RC-цепь, которая не только поворачивает фазу сигнала, но и уменьшает его амплитуду.

2. Включить приборы тумблерами «СЕТЬ». Установить выходные параметры сигнала генератора:

- амплитуду (ручка «ПРЕДЕЛЫ ШКАЛ» переводится в положение 10 В);
- частоту  $200 \pm 50$  Гц.

3. Соединить сигнальным кабелем один выход генератора с произвольным входом  $Y$  осциллографа. Оперировав управлением осциллографа, получить на экране осциллограмму синусоидального сигнала. При необходимости корректировать параметры луча ручками «ЯРКОСТЬ», «ФОКУС», «АСТИГМАТИЗМ». При этом:

- на панели «Синхронизация» установить синхронизацию «внутри», либо «+», либо «-»;
- на панели «Развертка» дискретная ручка «ВРЕМЯ/СМ» находится в положении  $10 \mu\text{S}$ , ручка «ПЛАВНО» переводится в положение «вкл»;
- на панели предусилителя коммутатора ручка «ПОЛЯРНОСТЬ» в положении «НОРМ»; род работы – «СИНХР»; усиление – либо 2 В/см, либо 0,2 В/см (в зависимости от примененного кабеля); вход  $Y$  открытый, т. е. входной импеданс – сопротивление 0,5 МОм.

Стабилизировать положение осциллограммы на экране следует ручками синхронизации и плавной развертки. Ручкой плавного усиления выбрать удобную амплитуду осциллограммы.

Ручкой смещения  $Y$  убрать изображение (или отсоединить вход  $Y$ ).

Аналогично выявить осциллограмму второго выходного сигнала генератора, пользуясь произвольным входом второго предусилителя коммутатора.

4. Совместить на экране обе осциллограммы. Выровнять их амплитуды. При необходимости корректировать стабильность ручками «ПОДСТРОЙКА» панели синхронизации и «ПЛАВНО» панели развертки. Смещением лучей по  $Y$  нулевые линии сигналов совместить с центральной линией маски экрана. При необходимости включить подсветку экрана.

Произвести измерение периода и временного сдвига сигналов по масштабной сетке экрана. Пользуясь формулами теоретического раздела, вычислить фазовый сдвиг.

## Форма отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений.
2. Эскиз осциллограмм с экрана осциллографа с обозначениями параметров сигналов и временного сдвига.
3. Расчет фазового сдвига.
4. Ответы на контрольные вопросы (по указанию преподавателя).

## Литература

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

## Контрольные вопросы

1. Поясните устройство электронно-лучевой трубки.
2. Для чего в канале  $Y$  есть линия задержки?
3. Поясните эскизом, как влияет на форму осциллограммы нелинейность сигнала генератора развертки осциллографа.
4. Как в осциллографе организовать круговую развертку?
5. Какие возможности предоставляет пользователю наличие канала  $Z$ ?
6. Как по масштабной сетке экрана определить параметры сигнала (амплитуду и частоту)?
7. Что такое чувствительность электронно-лучевой трубки?
8. Как работает система синхронизации осциллографа? Поясните эскизом влияние уровня синхронизации.
9. Что такое фаза колебаний?
10. Как с помощью осциллографа измеряют фазовый сдвиг?
11. Как влияют параметры сигнала горизонтальной развертки на результат измерения фазового сдвига?
12. Как изменится результат измерения сдвига фаз, если сигналы имеют разные амплитуды?
13. Можно ли проводить измерение сдвига фаз двух синусоидальных сигналов, если их нулевые линии не совпадают?
14. Как изменятся осциллограммы сигналов, если открытые входы каналов  $Y$  переключить на закрытые?
15. Для чего в осциллографе предназначен калибратор?

## Лабораторная работа № 2

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

**Цель работы:** ознакомиться с методами измерения напряжений и нахождения погрешностей однократных измерений различными приборами и освоить практические навыки выявления результата.

**Оборудование:**

1. Источник электропитания ВМ 207.
2. Вольтметр АМВ.
3. Вольтметр Д50152.
4. Вольтметр Э87.

### Теоретическая часть

Измерение напряжения и силы тока наиболее часто применяют в практике метрологии и электрорадиоизмерений. При этом в телекоммуникационных системах 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 в ней электрических процессов, поскольку его входное сопротивление достаточно велико. 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 прямые или косвенные измерения силы тока, поэтому вопросы измерения напряжения и силы тока рассматривают совместно.

В настоящее время метрологическая техника позволяет измерять напряжения в диапазоне  $10^{-10} \dots 10^6$  В и токи в диапазоне  $10^{-18} \dots 10^5$  А. Вместе с тем данные измерения следует осуществлять в очень широкой полосе частот – от постоянного тока и инфранизких частот (сотые доли герца) до сверхвысоких (1 ГГц и более).

Приборы, измеряющие параметры сигналов с частотами до  $10^4$  Гц, – низкочастотные, до  $10^8$  Гц – высокочастотные, свыше – диапазон сверхвысоких частот, требующий специальных измерительных методов.

Измерение параметров напряжения переменного тока – довольно сложная метрологическая задача, связанная с обеспечением требуемого частотного диапазона и учетом формы кривой измеряемого

сигнала. Переменное напряжение характеризуется несколькими параметрами, и его уровень может быть определен по *амплитудному*, *действующему* (среднеквадратическому, эффективному) или *средневыпрямленному* (постоянному) значению. Напомним некоторые характеристики и параметры напряжения переменного тока.

*Мгновенные значения напряжения  $U(t)$*  наблюдают на осциллографе или экране любого другого устройства (рис. 2.1) и определяют для каждого момента времени.

*Амплитуда* (лат. *amplitudo* – значительность, величие; устаревший термин – *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. 2.1, *а*, *б*, *в*). При разнополярных несимметричных кривых напряжения различают два амплитудных значения (рис. 2.1, *г*) – положительное и отрицательное:  $U_m^+$  и  $U_m^-$ .

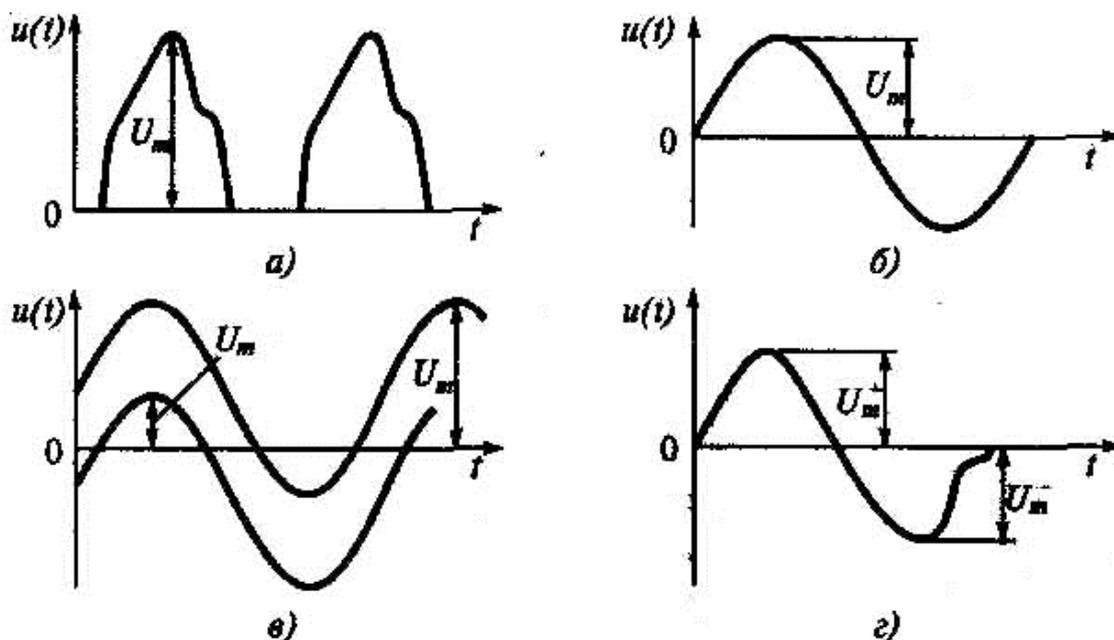


Рис. 2.1. Амплитуда напряжения: *а* – импульсы положительной полярности; *б* – синусоидальное напряжение; *в* – сумма синусоиды и постоянной составляющей; *г* – несинусоидальное колебание

*Действующее (среднеквадратическое)* напряжение определяют как корень квадратный из среднего квадрата мгновенного значения напряжения за время измерения (или за период):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} .$$

При несинусоидальном периодическом сигнале квадрат действующего значения равен сумме квадратов постоянной составляющей и действующих значений гармоник:

$$U^2 = U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots .$$

*Среднее значение* напряжения равно среднему арифметическому всех мгновенных значений за период:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt .$$

*Средневыпрямленное (постоянная составляющая)* напряжение определяется как среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt .$$

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  $U_{\text{ср}} = 0$ ,  $U_{\text{ср.в}} = 0,637 U_m$ .

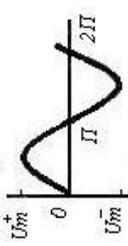
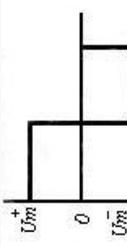
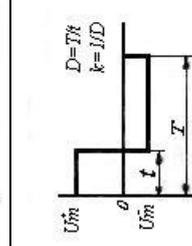
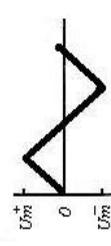
Наибольшая потребность существует в измерении действующего значения напряжения, поскольку этот параметр связан с мощностью, нагревом, потерями. Часто проще измерить амплитудное или средневыпрямленное значение и пересчитать с применением коэффициентов амплитуды  $K_a$  и формы  $K_\phi$ :

$$K_a = U_m / U ; K_\phi = U / U_{\text{ср.в}} .$$

Значения этих коэффициентов для наиболее употребляемых видов сигналов и соотношения между ними приведены в табл. 2.1, где все величины напряжений обозначены буквой  $U$ .

Таблица 2.1

Количественные соотношения между различными значениями ряда распространенных сигналов

Форма сигнала	Параметр сигнала				
	Амплитуда, $U_m, В$	Средневыпрямленное значение $U_{ср.в}, В$	Среднеквадратическое значение $U, В$	Коэффициент формы $K_\phi = \frac{U}{U_{ср.в}}$	Коэффициент амплитуды $K_a = \frac{U_m}{U}$
	$U_m^+ = U_m^-$	$\frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m$	$0,707 U_m$	$\frac{0,707 U_m}{0,637 U_m} = 1,11$	$\frac{U_m}{0,707 U_m} = 1,414$
	$U_m^+ = U_m^-$	$U_m$	$U_m$	1	1
	$U_m^+ = U_{m1}$ $U_m^- = -U_{m2}$ $U_m^+ + U_m^- = U_{m-m}$	$2 \frac{(D-1)}{D^2} U_{m-m}$ или $2k(1-k)U_{m-m}$	$\sqrt{\frac{1}{D} \left(1 - \frac{1}{D}\right)} U_{m-m}$ или $\sqrt{k(1-k)} U_{m-m}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{k(1-k)}}$	$\sqrt{D-1}$ или $\sqrt{\frac{1-k}{k}}$
	$U_m^+ = U_m^-$	$\frac{U_m}{2} = 0,5 U_m$	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_m = 0,577 U_m$	$\frac{0,577 U_m}{0,5 U_m} = 1,155$	$\frac{U_m}{0,577 U_m} = 1,733$

Напряжение или сила тока могут измеряться приборами непосредственной оценки или приборами, использующими метод сравнения (компенсаторами). По структурным схемам все приборы, измеряющие напряжение и силу тока, можно разделить:

- на электромеханические;
- электронные аналоговые;
- электронные цифровые.

Электромеханические измерительные приборы строятся по обобщенной структурной схеме, представленной на рис. 2.2.

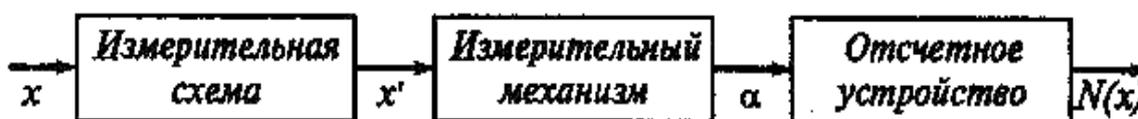


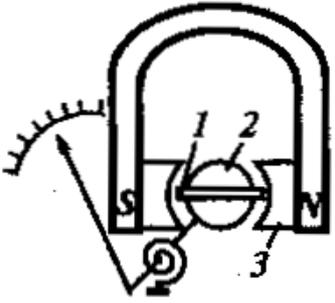
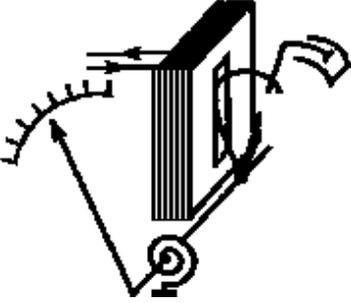
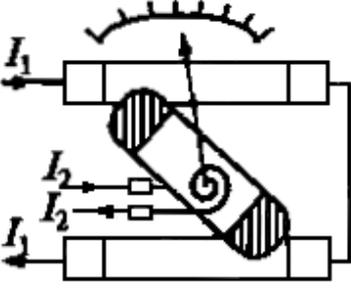
Рис. 2.2. Структурная схема электромеханического прибора

Измерительная схема осуществляет количественное или качественное преобразование входной величины  $x$  в электрическую величину  $x'$ , на которую реагирует измерительный механизм. Последний, в свою очередь, преобразует электрическую величину  $x'$  в механическое угловое или линейное перемещение  $a$ , значение которого отражается по шкале отсчетного устройства, проградуированной в единицах измеряемой величины  $N(x)$ .

Электромеханические приборы классифицируются по типу измерительного механизма. Наиболее распространены в практике радиотехнических измерений следующие системы: *магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, электростатическая*. Данные системы представлены в сводной табл. 2.2, в которой приведены также формулы передаточной функции (уравнения шкалы) измерительного механизма и некоторые его технические характеристики.

Таблица 2.2

Электромеханическая группа приборов

Наименование системы, функциональная схема	Уравнение шкалы, применение	Частотный диапазон, потребление, класс точности
<p><i>Магнитоэлектрическая:</i>                      1 – рамка с током                      2 – неподвижный сердечник                      3 – полюсные наконечники</p> 	$\alpha = I \frac{\Psi_0}{W}$ <p>где <math>\Psi_0 = BS\omega</math>;  <math>B</math> – индукция в зазоре  <math>S</math> – площадь рамки  <math>\omega</math> – число витков рамки  <math>W</math> – удельный противодействующий момент, создаваемый пружинкой.                      Переносные, лабораторные многопредельные амперметры, вольтметры постоянного тока</p>	<p>Постоянный ток                      Класс точности                      0,05...0,5  <math>P_{\text{соб}} \cong 10^{-5} \dots 10^{-4}</math> Вт</p>
<p><i>Электромагнитная</i></p> 	$\alpha = \frac{1}{2W} I_d^2 \frac{dL}{d\alpha}$ <p>где <math>I_d^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt</math>;  <math>L</math> – индуктивность катушки.                      Щитовые и лабораторные переносные низкочастотные амперметры, вольтметры</p>	<p><math>F = 0 \dots 5</math> кГц                      Класс точности                      0,5...2,5  <math>P_{\text{соб}} \cong 1 \dots 6</math> Вт</p>
<p><i>Электродинамическая</i></p> 	$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cos \theta \frac{dM}{d\alpha}$ <p>где <math>\theta</math> – угол между токами;  <math>M</math> – коэффициент взаимной индуктивности катушек.                      Лабораторные приборы низкочастотные высокого класса точности</p>	<p><math>F = 0 \dots 5</math> кГц                      Класс точности                      0,1...0,2  <math>P_{\text{соб}} = 1</math> Вт</p>
<p><i>Электростатическая</i></p>  <p>Подвижная пластина      Неподвижная пластина</p>	$\alpha = \frac{1}{2W} U_d^2 \frac{dc}{d\alpha}$ <p>где <math>U_d^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt</math>.                      Высокочастотные лабораторные и высоковольтные вольтметры</p>	<p><math>F = 0 \dots 30</math> МГц                      Класс точности                      0,5...1,5  <math>P_{\text{соб}} &lt; 1</math> мВт</p>

*Магнитоэлектрическая система* – система, в которой измерительный механизм состоит из проволочной рамки с протекающим в ней током, помещенной в поле постоянного магнита (магнитопровода). Поле в зазоре, где находится рамка, сделано равномерным за счет особой конфигурации магнитопровода. Под воздействием тока  $I$  рамка вращается в магнитном поле, угол поворота  $\alpha$  ограничивается специальной пружинкой, в результате чего передаточная функция оказывается линейной:

$$\alpha = I \frac{\Psi_0}{W},$$

где  $\Psi_0$  – удельное потокосцепление, определяемое параметрами рамки и магнитной индукцией;  $W$  – удельный противодействующий момент, создаваемый пружинкой.

На основе магнитоэлектрического механизма конструируют вольтметры, амперметры, миллиамперметры, что определяется измерительной схемой. Приборы магнитоэлектрической системы обладают хорошими техническими характеристиками (высокой точностью, малым потреблением энергии из измерительной цепи, высокой чувствительностью), но работают только на постоянном токе.

*Электромагнитная система* – система, в которой измерительный механизм состоит из воздушной катушки, в которую втягивается ферромагнитный сердечник при любой полярности тока. Это обусловлено тем, что ферромагнетик располагается в магнитном поле так, чтобы поле усилилось. Следовательно, прибор электромагнитной системы может работать на переменном токе. Однако данный прибор низкочастотный, так как с ростом частоты сильно увеличивается индуктивное сопротивление катушки. На основе электромагнитной системы создаются вольтметры и амперметры (часто как щитовые) на конкретную частоту – 50, 400, 1000 Гц.

К достоинствам системы можно отнести: конструктивную простоту, надежность, возможность измерения действующего значения. Среди недостатков – ограниченный частотный диапазон, большое потребление мощности от измерительной цепи, низкая чувствительность.

*Электродинамическая система* – система, в которой измерительный механизм содержит две измерительные катушки (неподвиж-

ную и подвижную), электромагнитные поля которых взаимодействуют в соответствии с формулой

$$M_{\text{вр}} = I_1 I_2 \cos \theta \frac{dM}{d\alpha},$$

где  $M_{\text{вр}}$  – вращающий момент;  $I_1$  – ток через неподвижную катушку;  $I_2$  – ток через подвижную катушку;  $\theta$  – фазовый сдвиг между синусоидальными токами.

На основе электродинамического механизма в зависимости от схемы соединения обмоток можно изготавливать вольтметры, амперметры, ваттметры. Достоинство электродинамических вольтметров и амперметров – высокая точность на переменном токе. Основная приведенная погрешность может быть равна 0,1...0,2 %, что считается наилучшим достижимым показателем для приборов переменного тока. По другим показателям электродинамические приборы близки к электромагнитным. Электродинамические приборы используют как образцовые лабораторные измерительные приборы.

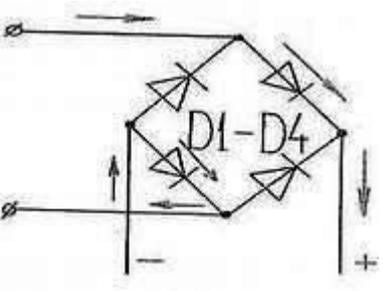
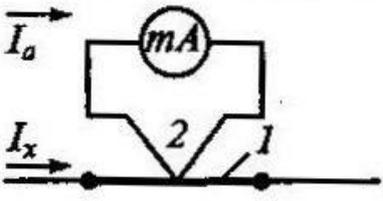
*Электростатические приборы* – приборы, где принцип действия электростатического механизма основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Подвижная алюминиевая пластина, закрепленная вместе со стрелкой, перемещается, взаимодействуя с неподвижной пластиной. Ограничение движения (как и в других электромеханических системах) осуществляется за счет пружинки. Электростатические приборы по принципу действия механизма представляют собой вольтметры. Достоинства таких приборов – широкий частотный диапазон (до 10 МГц) и малая мощность, потребляемая из измерительной цепи. Приборы измеряют действующее значение напряжения.

Описанные выше приборы не решают многих проблем, возникающих при измерении на переменном токе: электромагнитные и электродинамические низкочастотны, электростатические же обладают низкой чувствительностью.

Применение магнитоэлектрического механизма в сочетании с преобразователем позволяет существенно расширить возможности измерений на переменном токе. По типу преобразователя данные приборы делят на выпрямительные и термоэлектрические. Описание свойств схем представлено в табл. 2.3.

Таблица 2.3

## Магнитоэлектрическая система с преобразователями

Наименование системы, функциональная схема	Уравнение шкалы, применение	Частотный диапазон, собственное потребление мощности, класс точности
<p>Выпрямительная система</p> 	$\alpha = \frac{\Psi_0}{W} I_{\text{ср.в}},$ <p>где <math display="block">I_{\text{ср.в}} = \frac{1}{T} \int_0^T  i  dt.</math></p> <p>Переносные многопредельные амперметры-вольтметры на постоянный и переменный токи</p>	<p><math>F = 0 \dots 100</math> кГц</p> <p>Класс точности 2,5...4 на переменном токе 1,5 на постоянном токе</p> <p><math>P_{\text{соб}} = 10^{-4} \dots 10^{-3}</math> Вт</p>
<p>Термоэлектрическая система: 1 – нагреватель; 2 – термопара</p> 	$\alpha = A I_d^2,$ <p>где <math display="block">I_d^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt;</math></p> <p><math>A</math> – коэффициент, учитывающий параметры нагревателя термопары и прибора.</p> <p>Амперметры на повышенную частоту</p>	<p><math>F = 0 \dots 5</math> МГц</p> <p>Класс точности 1,5...4,0</p> <p><math>P_{\text{соб}} = 0,01 \dots 1</math> Вт</p>

*Выпрямительные приборы* состоят из полупроводникового преобразователя переменного тока в постоянный и магнитоэлектрического прибора. Основной узел электрической схемы выпрямительного прибора – преобразователи. Для их построения широко используют полупроводниковые диоды.

Схему преобразователя можно строить разными способами, но в результате через измерительный механизм протекает однополярный пульсирующий ток (двухполупериодный или однополупериодный). В табл. 2.3 показан простейший двухполупериодный (двухтактный) диодный выпрямитель. Приборы проградуированы в *действующих значениях синусоидального тока*. Это значит, что на шкале прибора представлено не то значение, на которое реагирует прибор (т. е. средневывпрямленное), а величина, умноженная на коэффициент формы синусоиды  $K_\phi = 1,11$ .

*Термоэлектрическая система* – система, где приборы состоят из термоэлектрического преобразователя и магнитоэлектрического микроамперметра. Термопреобразователь включает в себя нагреватель, по которому протекает измеряемый ток, и термопару, на концах которой возникает термоЭДС. В цепь термопары включен микроамперметр, измеряющий термоток. Поскольку переменный ток преобразуется в постоянный путем превращения электрической энергии в тепло, прибор будет показывать действующее значение измеряемого тока.

Рассмотренные ранее приборы электромеханической группы относятся к приборам непосредственной оценки и все (в большей или меньшей степени) потребляют мощность из измерительной цепи, что может приводить к нарушению работы исследуемого объекта. Для сведения к минимуму влияния измерительного прибора на работу исследуемой схемы используют компенсационный метод измерения.

*Компенсаторы* – приборы, производящие измерение методом сравнения измеряемой величины с эталонной. Существуют компенсаторы переменного и постоянного тока. Компенсационный метод применяют также в цифровых измерительных приборах.

Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока для измерения напряжения  $U_x$  показана на рис. 2.3.

Источник постоянного напряжения  $E_0$  обеспечивает протекание рабочего тока  $I_p$  по цепи, состоящей из последовательно включенных измерительного  $R_{и}$ , установочного  $R_y$  и регулировочного  $R_{рег}$  резисторов.

*Нормальный элемент*  $E_{нэ}$  – гальванический элемент с точно известным значением ЭДС. Относительная погрешность такого элемента может находиться в пределах от 0,02 до 0,0002 % в зависимости от его класса. В схеме элемент НИ – нуль-индикатор, реагирующий на очень маленькие постоянные токи (чувствительность по току  $S_{НИ}$  порядка  $10^{-10}$  А/дел).

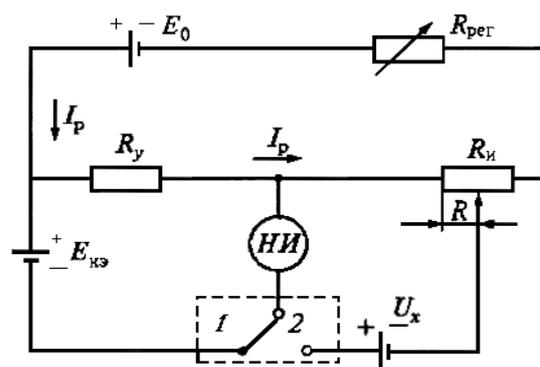


Рис. 2.3. Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока

При помощи 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 справедливо  $I_p R_y = E_{нэ}$  откуда величину рабочего тока определяют через соотношение  $I_p = E_{нэ}/R_y = 10^{-n}$  А. Для каждого типа компенсатора величина  $n$  – число свое и неизменное, что обеспечивается постоянством параметров источника напряжения  $E_{нэ}$  и установочного сопротивления  $R_y$ . Затем нуль-индикатор включают в измерительную цепь (положение 2) и изменением измерительного сопротивления  $R_{и}$  добиваются нулевого тока, а значит, и равенства  $U_x = I_p R$ . Таким образом, измеряемое напряжение определяют с достаточно высокой точностью и без нарушения работы измерительной цепи, так как в момент измерения ток через индикатор не протекает.

В электронных вольтметрах, снабженных усилительными устройствами, потребление мощности из измерительной цепи ничтожно мало. Классифицировать электронные вольтметры можно по нескольким признакам:

- по назначению – вольтметры постоянного, импульсного, переменного напряжений; фазочувствительные, селективные, универсальные;
- по способу измерения – приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;
- по характеру измеряемого значения напряжения – амплитудные (пиковые), действующего 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 электронным вольтметрам присваивают 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.

Упрощенные структурные схемы аналоговых вольтметров представлены на рис. 2.4. В настоящее время аналоговые электронные вольтметры постоянного тока (рис. 2.4, а) находят ограниченное при-

менение, так как они по своим техническим свойствам сильно уступают цифровым вольтметрам постоянного тока.

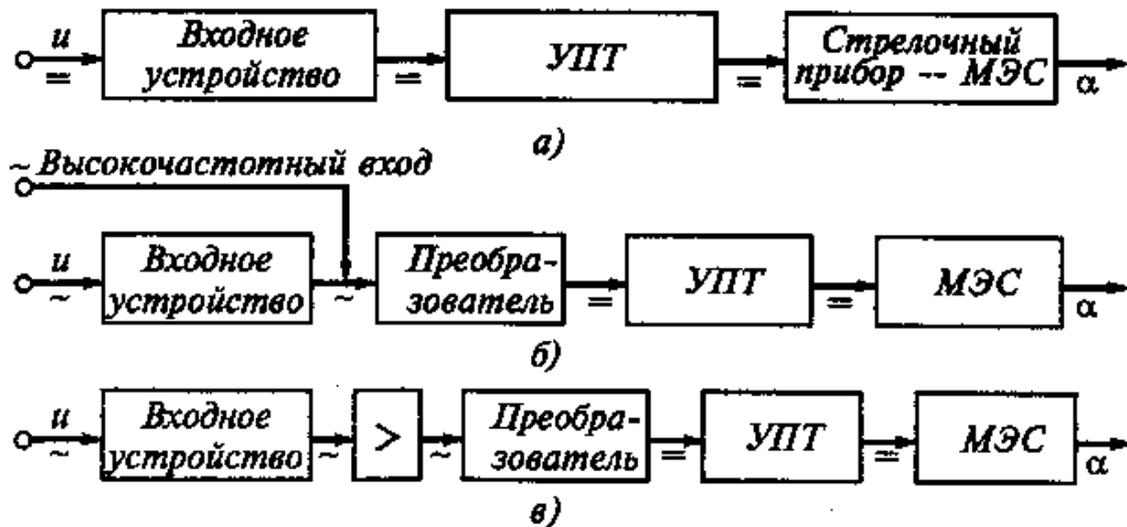


Рис. 2.4. Структурные схемы аналоговых электронных вольтметров:  
 а – постоянного тока; б – напряжений большого уровня; в – милливольтметра;  
 УПТ – усилитель постоянного тока; > – усилитель переменного тока;  
 МЭС – магнитоэлектрическая система

Элементную базу, используемую при создании вольтметров переменного тока, определяют существующим на момент создания вольтметра уровнем техники (от полупроводниковых образцов до микроинтегрального исполнения), 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 на следующие типы: амплитудные (пиковые), действующего и средневыпрямленного значения. Тип детектора во многом определяет свойства прибора: так вольтметры с амплитудными детекторами – самые высокочастотные; вольтметры с детекторами действующего значения позволяют измерять напряжение любой формы; вольтметры средневыпрямленного значения пригодны только для измерения гармонического сигнала.

*Амплитудный детектор* – устройство, напряжение на выходе которого, т. е. на нагрузке, соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого сигнала. Это осуществляется за счет запоминания напряжения (накопления энергии при протекании тока через диод) на конденсаторе.

На рис. 2.5 изображены принципиальная и эквивалентная схемы, а также временные диаграммы амплитудного детектора с параллельным включением диода (детектор с закрытым входом).

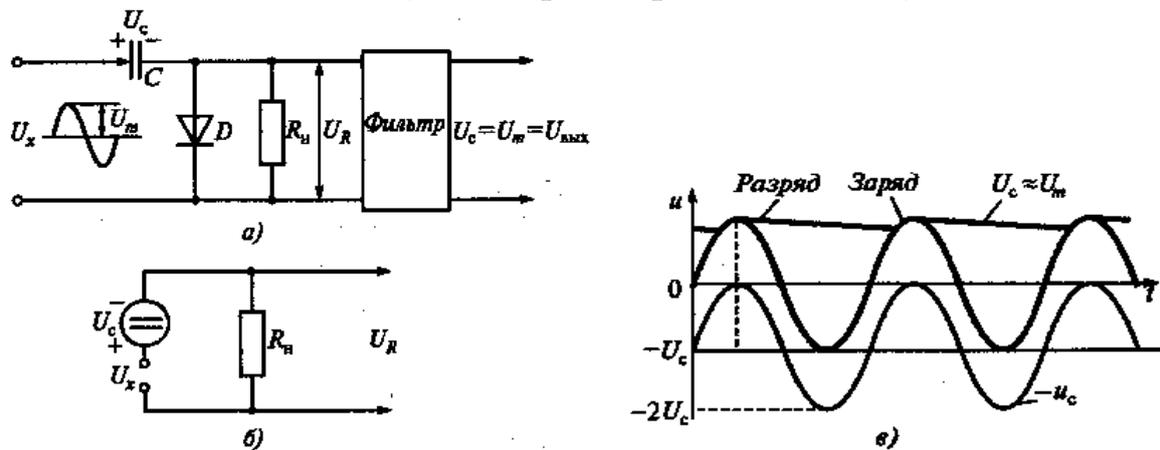


Рис. 2.5. Амплитудный детектор с параллельным диодом: а – принципиальная схема; б – эквивалентная схема; в – временные диаграммы

Рассмотрим работу детектора с закрытым входом (см. рис. 2.5, а) при подаче на него простейшего, гармонического напряжения  $U_x = U_m \sin \omega t$ .

В моменты времени, когда на вход поступает положительная полуволна, конденсатор  $C$  заряжается через диод, сопротивление которого в открытом состоянии  $R_0$  мало ( $R_0 \ll R_n$ ). Постоянная времени заряда  $\tau_z = R_0 C$  мала, и заряд конденсатора до максимального значения  $U_m$  происходит быстро. За время отрицательной полуволны конденсатор  $C$  разряжается, так как сопротивление нагрузки  $R_n$  выбирается достаточно большим (50...100 МОм). Таким образом, постоянная разряда  $\tau_p = RC$  оказывается значительно больше периода  $T = 2\pi/\omega$  переменного напряжения. В результате конденсатор останется заряженным до напряжения, близкого к  $U_c = U_m = U_{вых}$ . Упрощенная эквивалентная схема амплитудного детектора и временные диаграммы, поясняющие его работу, представлены на рис. 2.5 б, в.

Изменение напряжения на нагрузочном сопротивлении  $R_n$  определяется разностью амплитуды входного напряжения  $U_x$  и напряжения на конденсаторе  $U_c$ :  $U_R = U_x - U_c$ . Таким образом, выходное напряжение  $U_R$  будет пульсирующим с удвоенной амплитудой измеряемого напряжения, как это показано на рис. 2.5, в. Это подтверждается и простыми математическими выкладками:

$$U = U_m \sin \omega t - U_c \approx U_m \sin \omega t - U_m.$$

Для выделения постоянной составляющей сигнала  $U = -U_c$  на выходе детектора ставят емкостный фильтр, подавляющий все остальные гармоники тока.

*Детектор действующего значения* – преобразователь переменного напряжения в постоянное, пропорциональное квадрату действующего значения измеряемого напряжения. Значит, измерение действующего напряжения связано с выполнением трех операций: возведением в квадрат мгновенного значения сигнала, усреднением и извлечением корня из результата усреднения (последнюю операцию обычно осуществляют при градуировке шкалы вольтметра). В квадрат мгновенного значения, как правило, возводят ячейкой с полупроводниковым элементом путем использования квадратичного участка его характеристики; иногда этот участок создают искусственно.

*Цифровые вольтметры (ЦВ)* – наиболее распространенные цифровые приборы. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра представлена на рис. 2.6.

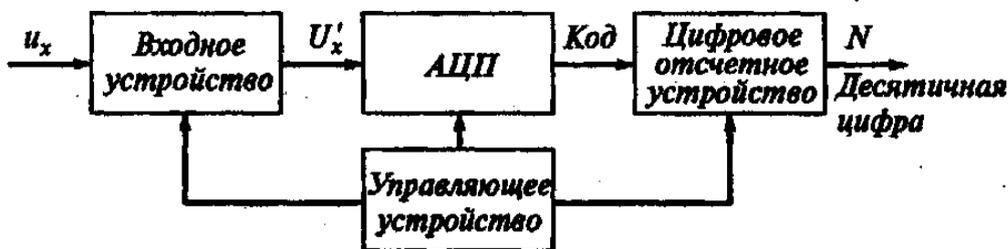


Рис. 2.6. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра

Входное устройство содержит делитель напряжения; в вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый сигнал в представленный цифровым кодом. Использование в АЦП двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование цифрового кода в десятичное число, отражаемое цифровым отсчетным устройством. Узлы схемы соединены с управляющим устройством.

По типу АЦП цифровые вольтметры могут быть разделены на четыре группы:

- кодоимпульсные (с поразрядным уравниванием);
- времяимпульсные;
- частотно-импульсные;
- пространственного кодирования.

В настоящее время цифровые вольтметры строятся чаще на основе кодоимпульсного и времяимпульсного преобразования.

В кодоимпульсных цифровых вольтметрах реализуется принцип компенсационного метода измерения напряжения. Упрощенная структурная схема такого вольтметра представлена на рис. 2.7. Измеряемое напряжение  $U'_x$ , полученное с входного устройства, сравнивают с компенсирующим напряжением  $U_k$ , вырабатываемым прецизионным делителем. Компенсирующее напряжение имеет несколько уровней, квантованных в соответствии с двоично-десятичной системой счисления.

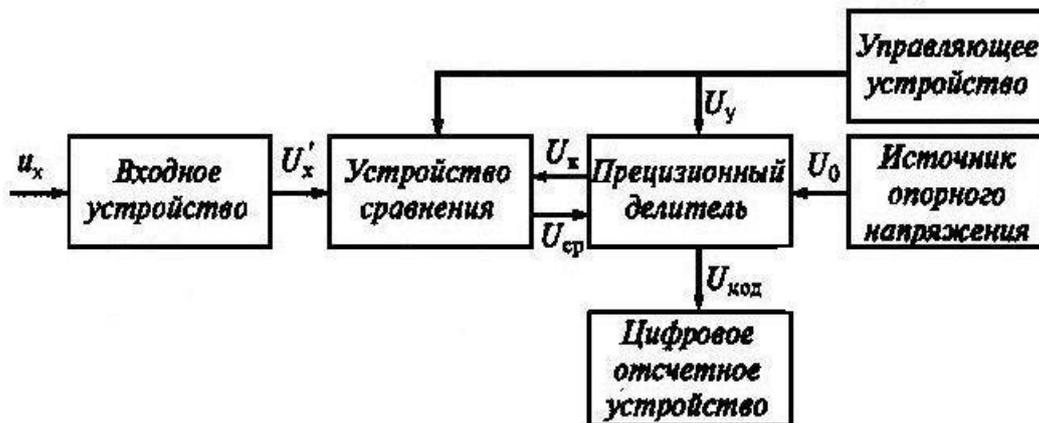


Рис. 2.7. Упрощенная структурная схема кодоимпульсного вольтметра

Сравнение по величине двух напряжений (измеряемого  $U'_x$  и компенсирующего  $U_k$ ) производят последовательно по команде с управляющего устройства. Процесс сравнения показан на рис. 2.8. Управляющие импульсы  $U_y$  через определенные промежутки времени переключают сопротивления точного делителя таким образом, что на выходе делителя возникают последовательно сигналы: 80, 40, 20, 10, 8, 4, 2, 1 В; одновременно к соответствующему выходу прецизионного делителя подключают устройство сравнения.

Если соотношение напряжений  $U_k > U'_x$ , то с устройства сравнения поступает сигнал на отключение в делителе соответствующего звена так, чтобы снять показания сигнала. 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 считывает отсчетное устройство. На рис. 2.8 показан процесс кодирования аналогового напряжения 63 В, из которого видно, что код, соответствующий этому сигналу, будет выглядеть как 01100011.

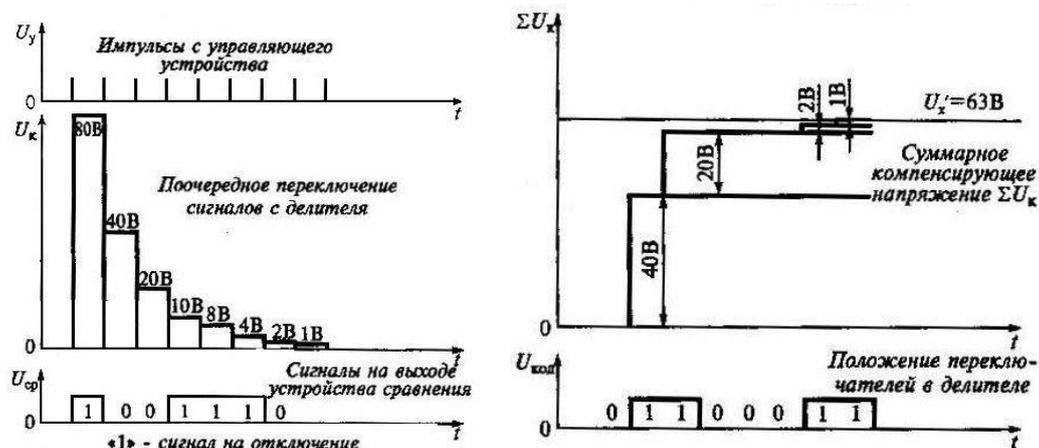


Рис. 2.8. Графики, поясняющие работу кодоимпульсного вольтметра

Процесс измерения напряжения в кодоимпульсном приборе напоминает взвешивание на весах, поэтому приборы иногда называют *поразрядно-уравновешивающими*.

В цифровых вольтметрах времяимпульсного (временного) типа содержатся АЦП с промежуточным преобразованием измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, который заполняют импульсы, следующие с известной частотой. В результате такого преобразования дискретный сигнал измерительной информации на выходе преобразователя имеет вид пачки счетных импульсов, число которых пропорционально измеряемому напряжению.

Включение в структурную схему цифрового вольтметра, микропроцессора и дополнительных преобразователей позволяет превратить его в универсальный измерительный прибор – цифровой мультиметр.

### ***Классы точности средств измерений***

Общие положения деления средств измерений (СИз) по классу точности устанавливает ГОСТ 8.401-80.

*Класс точности* – это обобщенная характеристика СИз, выражаемая пределами допускаемых значений его основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности нельзя считать непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этой СИз, поскольку 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 СИз данного типа.

Пределы допускаемой основной погрешности  $\Delta_{СИз}$ , определяемые классом точности, – это интервал, в котором находится значение основной погрешности СИз. Если СИз имеет незначительную случайную составляющую, то определение  $\Delta_{СИз}$  относится к нахождению систематической погрешности и случайной погрешности, обусловленной гистерезисом, и считается достаточно строгим.

Если СИз имеет существенную случайную погрешность, то для него определение предела допускаемой основной погрешности нечетко. Его следует понимать как интервал, в котором находится значение основной погрешности с неизвестной вероятностью.

Средство измерений может иметь два и более классов точности – например, при наличии у него двух или более диапазонов измерений одной и той же физической величины. Приборы, предназначенные для измерения нескольких физических величин, также могут иметь различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливаются по одной из формул:

$$\Delta = \pm a \quad (2.1)$$

$$\text{или } \Delta = \pm (a + bx), \quad (2.2)$$

где  $x$  – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанное по шкале;  $a, b$  – положительные числа, не зависящие от  $x$ .

Первая формула описывает чисто аддитивную погрешность (рис. 2.9, а), а вторая – сумму аддитивной и мультипликативной погрешностей (рис. 2.9, в). В технической документации классы точности, установленные в виде абсолютных погрешностей, обозначают, например, «Класс точности М», а на приборе – буквой «М». Для обозначения используют прописные буквы латинского алфавита или римские цифры, причем меньшие пределы погрешностей должны соответствовать буквам, находящимся ближе к началу алфавита, или меньшим цифрам.

Предел допускаемой погрешности может быть задан в относительной форме:

$$\gamma = \Delta / x_N = \pm p, \quad (2.3)$$

где  $x_N$  – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и  $\Delta$ ;  $p$  – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда значений:  $(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \cdot 10^n$ ;  $n = 1; 0; -1; -2; \dots$

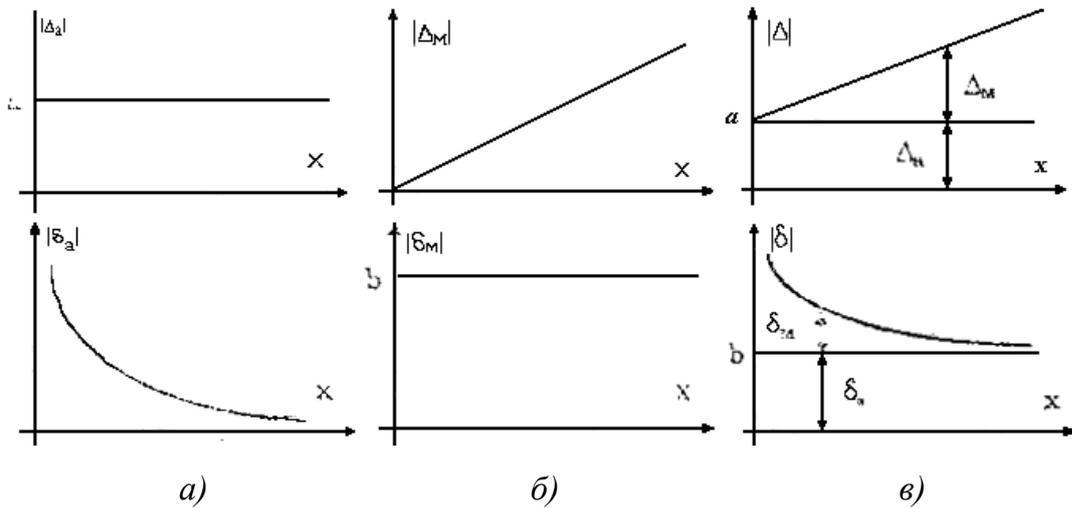


Рис. 2.9. Погрешности в абсолютной и относительной формах:  
*a* – аддитивная; *б* – мультипликативная; *в* – суммарная

Нормирующее значение  $x_N$  устанавливают равным большему из пределов измерений (или модулей) для СИз с равномерной, практически равномерной или степенной шкалами и для измерительных преобразователей, если нулевое значение выходного сигнала находится на краю или вне диапазона измерений.

Значение относительной погрешности для верхнего предела измерений  $x_N$  [см. формулу (2.3)], выраженное в процентах, называют классом точности  $k_T$  (величина  $p$ )

$$k_T = \Delta / x_N \cdot 100. \quad (2.4)$$

Относительная погрешность измерения неизвестной величины  $x$

$$\gamma_x = \frac{k_T x_N}{x}. \quad (2.5)$$

Если относительная погрешность нормирована по всему диапазону измерения, то эту величину выражают в процентах, записывают с обводкой окружности, например  $k = 1,5$ . Тогда

$$\gamma_x = k. \quad (2.6)$$

В случае задания абсолютной погрешности по формуле (2.2) относительная погрешность измеряемой величины  $x$  составит

$$\gamma_x = \Delta / x = \pm [a + b(x_N / x - 1)]. \quad (2.7)$$

При использовании формулы (2.7) класс точности обозначается в виде  $0,02/0,01$ , где числитель – конкретное значение числа  $a$ , знаменатель – числа  $b$ . В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности определяют по более сложным формулам либо в виде графика или таблицы (ГОСТ 8.009-84).

### Порядок выполнения работы

1. Познакомиться с устройством и принципом действия приборов различных систем, обратить внимание на информацию, отраженную на циферблатах представленных приборов.

2. Провести измерительный эксперимент:

– установить на вольтметре АВО-5М диапазон измерения 15 В, подключить вольтметр к выходу 12,6 В источника питания ВМ 207, после чего записать результат;

– установить на вольтметре Д50152 диапазон измерения 150 В, подключить вольтметр к выходу 55 В источника питания ВМ 207. Подключить выход 4 В (подсветка шкалы) с входом 4 В источника электропитания ВМ 207 и записать результат;

– соединить проводниками клеммы диапазона 15 В вольтметра Э87 с выходом 6,3 В источника питания ВМ 207, после чего записать результат.

3. Пользуясь методикой, изложенной в предыдущем разделе, вычислить результат измерения и предоставить его (для трех опытов) в виде

$$U = U_{\text{н}} \pm \Delta,$$

где  $U_{\text{н}}$  – номинальное значение напряжения, В;  $\Delta$  – абсолютная погрешность.

Обратить внимание, что метрологические параметры приборов заданы по-разному:

- для АВО-5М – 0,5;
- Д50152 – 0,2;
- Э87 – 0,1.

4. Вычислить относительную погрешность  $\gamma$  каждого измерения.

## Форма отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений.
2. Результаты измерений по п. 2 порядка выполнения работы.
3. Результаты вычислений по пп. 3, 4 порядка выполнения работы.
4. Ответы на контрольные вопросы (по указанию преподавателя).

## Литература

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебник / В. Н. Нефедов [и др.]. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

## Контрольные вопросы и задания

1. Укажите достоинства и недостатки термоэлектрических приборов. Поясните, чем обусловлены эти свойства.
2. Можно ли каркас рамки приборов магнитоэлектрической системы выполнить из пластмассы?
3. Какие требования предъявляют к опорам осей электромеханических приборов? Почему рамка прибора Д50152 установлена на упругой оси (растяжке)?
4. Как влияет частота переменного тока на показания приборов электромагнитной системы?
5. В чем главная причина высокой точности приборов электродинамической системы?
6. Какой параметр прибора увеличивается с применением оптического отсчета (как у вольтметра Д50152) по сравнению со случаем механической стрелки?
7. Что отражают коэффициенты формы и амплитуды? Можно ли ими воспользоваться при произвольной форме напряжения?
8. Поясните принцип действия пикового детектора.
9. Что такое действующее значение напряжения и как эта величина выявляется в детекторе действующего значения?

10. В чем разница кодоимпульсного и времяимпульсного преобразователей в цифровых вольтметрах?

11. Какие варианты задания предела допускаемой основной погрешности предусмотрены существующей нормативной документацией?

12. Что такое дополнительная погрешность?

13. К какому виду относится погрешность параллакса?

14. Отражает ли результат однократного измерения случайную погрешность?

15. Почему в приборах магнитоэлектрической системы:

– применены две спиральные пружинки?

– одна из них имеет правую навивку, а другая – левую?

16. Перечислите основные принципы, лежащие в основе выбора нормируемых метрологических характеристик средств измерений.

17. Какой нормативный документ регламентирует нормирование метрологических характеристик средств измерений?

18. На какие группы делятся нормируемые метрологические характеристики?

19. Какие метрологические характеристики относятся к характеристикам, предназначенным для определения результатов измерений?

20. Какие метрологические характеристики описывают погрешность средств измерений? Каким образом происходит их нормирование?

21. Что такое классы точности средств измерений?

22. Какие различные способы выражения класса точности существуют?

23. Что такое систематическая погрешность? Приведите пример.

## Лабораторная работа № 3 ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

**Цель работы:** ознакомиться с параметрами измерительных сигналов, аппаратурной реализацией (генераторами), освоить практические навыки определения основных параметров сложных сигналов.

**Оборудование:**

1. Генератор стандартных сигналов Г4-18.
2. Осциллоскоп CQ5010B.

### Теоретическая часть

Электрические генераторы предназначены для выработки электрических сигналов.

*Сигнал* – это материальный носитель информации, представляющий собой некоторый физический процесс, один из параметров которого функционально связан с измеряемой физической величиной. Такой параметр называют *информативным*.

*Измерительный сигнал* – это сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине. Основные понятия, термины и определения в области измерительных сигналов устанавливает ГОСТ 16465-70 «Сигналы радиотехнические. Термины и определения». Измерительные сигналы чрезвычайно разнообразны.

**По характеру измерения информативного и временного параметров** измерительные сигналы делят на аналоговые, дискретные и цифровые.

*Аналоговый сигнал* – это сигнал, описываемый непрерывной или кусочно-непрерывной функцией  $Y_a(t)$ , причем как сама эта функция, так и ее аргумент могут принимать любые значения на заданных интервалах  $Y \in (Y_{\min}; Y_{\max})$  и  $t \in (t_{\min}; t_{\max})$  (рис. 3.1, а).

*Дискретный сигнал* – это сигнал, изменяющийся дискретно во времени или по уровню. В первом случае он может принимать в дискретные моменты времени  $nT$ , где  $T = \text{const}$  – интервал (период) дискретизации,  $n = 0; 1; 2; \dots$  – целое, любые значения  $Y_d(nT) \in (Y_{\min}; Y_{\max})$ , называемые *выборками*, или *отсчетами*. Такие сигналы (см. рис. 3.1, б) описываются решетчатыми функциями. Во втором случае значения сигнала  $Y_d(t)$  существуют в любой момент времени  $t \in (t_{\min}; t_{\max})$ , однако они могут принимать ограниченный ряд значений  $hi = nq$ , кратных кванту  $q$ .

*Цифровые сигналы* – квантованные по уровню и дискретные по времени сигналы  $Y_{ц}(nT)$ , которые описываются квантованными решетчатыми функциями (квантованными последовательностями), принимающими в дискретные моменты времени  $nT$  лишь конечный ряд дискретных значений – уровней квантования  $h_1, h_2, \dots, h_n$  (см. рис. 3.1, в)

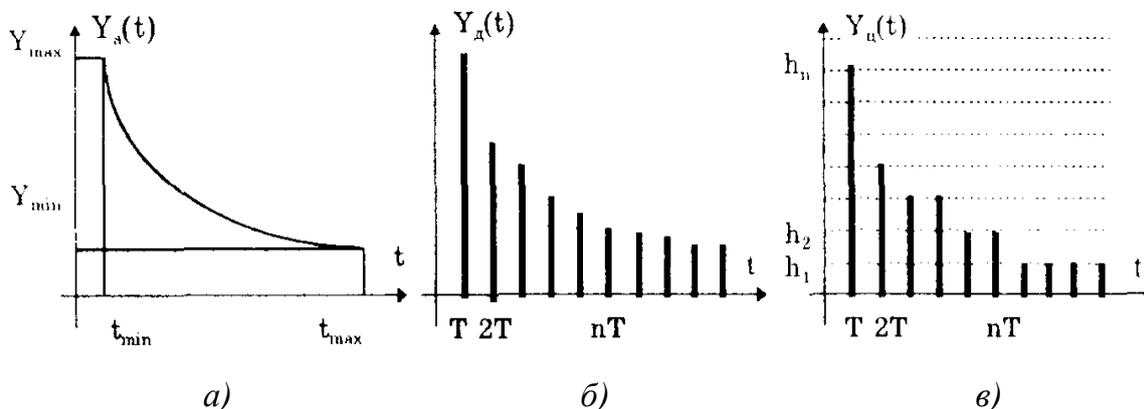


Рис. 3.1. Измерительные сигналы: *a* – аналоговый; *б* – дискретный (по времени); *в* – цифровой

**По характеру изменения во времени** сигналы делятся на постоянные, значения которых с течением времени не изменяются, и переменные, значения которых меняются во времени.

*Переменные* сигналы могут быть непрерывными во времени и импульсными. *Непрерывным* называют сигнал, параметры которого изменяются непрерывно. *Импульсный* сигнал – это сигнал конечной энергии, существенно отличный от нуля в течение ограниченного интервала времени, соизмеримого со временем завершения переходного процесса в системе, для воздействия на которую этот сигнал предназначен.

**По степени наличия априорной информации** переменные измерительные сигналы делятся на детерминированные, квазидетерминированные и случайные. *Детерминированный сигнал* – это сигнал, закон изменения которого известен, а модель не содержит неизвестных параметров. Мгновенные значения детерминированного сигнала известны в любой момент времени. Детерминированными (с известной степенью точности) называют сигналы на выходе мер. Например, выходной сигнал генератора низкочастотного синусоидального сигнала характеризуется значениями амплитуды и частоты, которые установлены на его органах управления. Погрешности установки этих параметров определяются метрологическими характеристиками генератора.

В метрологии измерительные сигналы описываются математическими моделями вида  $Y = f(X, A, B, C, \dots)$ , где  $Y$  – основной информативный параметр сигнала;  $X$  – независимый аргумент сигнала;  $A, B, C$  – параметры сигнала. Вид модели выбирают в зависимости от конкретных условий решаемой задачи. Широко используется их *спектральное (частотное)* представление. В процессе передачи и обработки сигналов оно играет особую роль, поскольку определяет параметры используемой аппаратуры. Частотное представление основывается на преобразовании Фурье сигнала  $Y(t)$ :

$$Y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^x A_n \cos(n\omega t + \varphi_n),$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая;  $A_n, \varphi_n$  – амплитуда и фаза  $n$ -й гармоники.

Множество значений  $A_n(\omega)$  и  $\varphi_n(\omega)$  образуют соответственно амплитудный и фазовый спектры, которые характеризуют свойства сигнала  $Y(t)$  в частотной области. Такой спектр называют *линейчатым*, или *дискретным*.

Характерный вид амплитудного и фазового спектров для некоего периодического сигнала приведен на рис. 3.2.

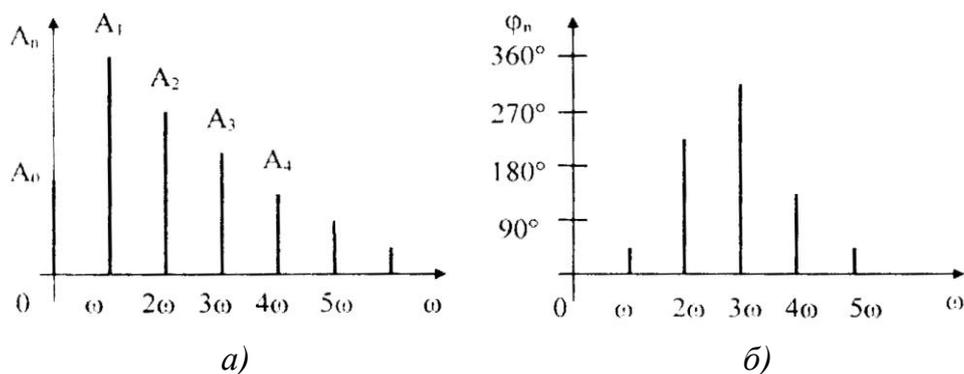


Рис. 3.2. Дискретные спектры: *а* – амплитудный; *б* – фазовый

Спектральное представление сигнала позволяет оценить его частотный диапазон, т. е. граничные частоты, между которыми заключены все или основные, имеющие наибольшие амплитуды гармонические составляющие сигнала. Частотный диапазон – важная характеристика сигнала, определяющая необходимую полосу пропускания средства измерения для передачи сигналов с требуемой точностью.

*Модулированным* называют сигнал, являющийся результатом взаимодействия двух или более сигналов, т. е. модуляции. Модуляция –

это воздействие измерительного сигнала  $X(t)$  на какой-либо параметр стационарного сигнала  $Y(t)$ , обладающего такими физической природой и характером изменения во времени, при которых удобны его дальнейшие преобразования и передача. В качестве стационарного сигнала, именуемого *несущим*, обычно выбирают синусоидальное (гармоническое) колебание

$$Y(t) = Y_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (3.1)$$

или последовательность импульсов.

Физический процесс, обратный модуляции, называется *демодуляцией*, или *детектированием*, и заключается в получении из модулированного сигнала другого сигнала, пропорционального модулирующему. Задача демодуляции – по возможности полное восстановление информации, содержащейся в модулирующем сигнале  $X(t)$ .

Вид модуляции и способ детектирования зависят от требований, предъявляемых к точности передачи информации. Наиболее простой модулированный гармонический сигнал – амплитудно-модулированный: в нем измерительная информация содержится в амплитуде несущего синусоидального сигнала (рис. 3.3).

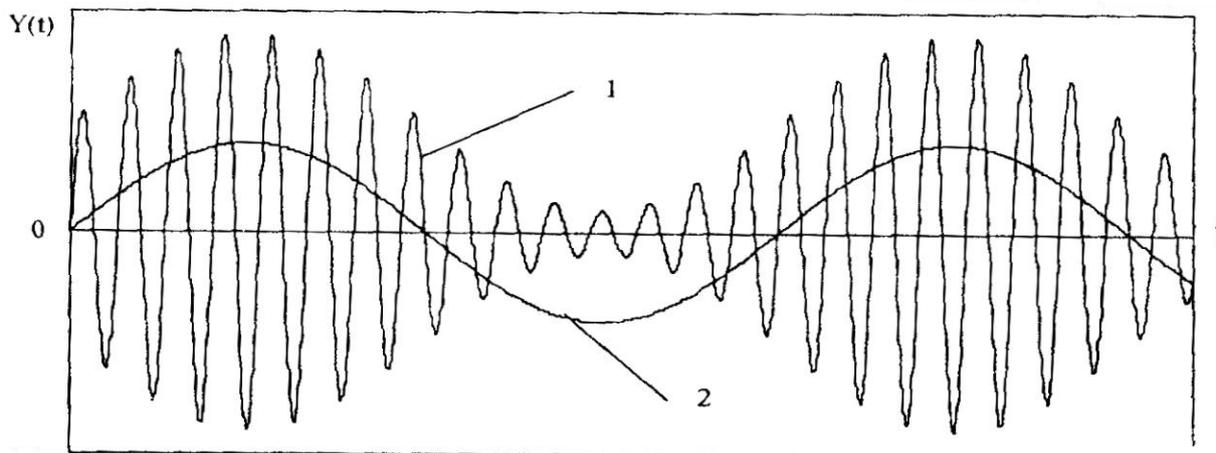


Рис. 3.3. Сигналы: 1 – амплитудно-модулированный; 2 – модулирующий

Амплитудно-модулированные сигналы описывают формулой

$$Y(t) = Y_m \left[ 1 + m \frac{X(t)}{X_m} \right] \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.2)$$

где  $m$  – глубина амплитудной модуляции (всегда меньше единицы).

При *частотной модуляции* (рис. 3.4) измерительная информация содержится в частоте модулированного сигнала, т. е.  $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \frac{X(t)}{X_m}$ , где  $\Delta\omega$  – наибольшее изменение частоты модулированного сигнала, т. е. девиация частоты, пропорциональная амплитуде модулирующего сигнала.

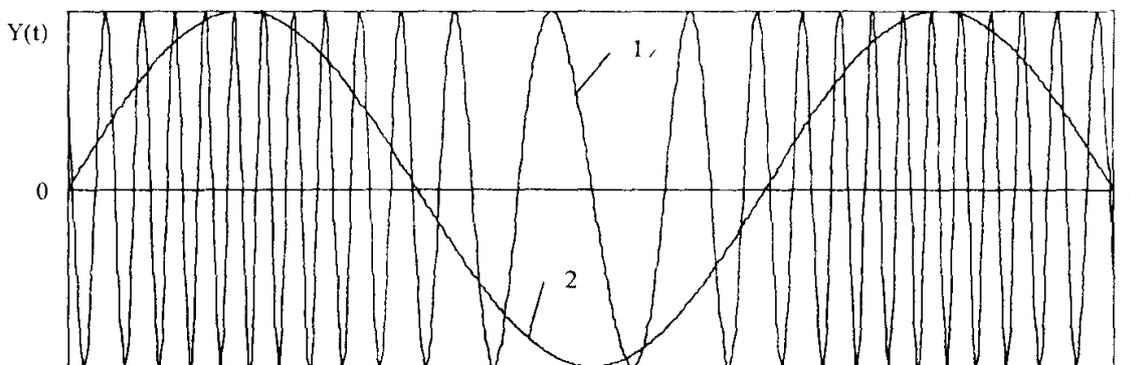


Рис. 3.4. Сигналы: 1 – частотно-модулированный; 2 – модулирующий

При *фазовой модуляции* (рис. 3.5) модулирующий сигнал  $X(t)$  воздействует на фазу несущего колебания:

$$Y(t) = Y_m \sin \left\{ \omega_0 t + \varphi_0 \left[ 1 + m_\phi \frac{X(t)}{X_m} \right] \right\},$$

где  $m_\phi$  – коэффициент фазовой модуляции.

Для того чтобы при детектировании можно было восстановить модулирующий сигнал, необходимо иметь сигнал вида (1), называемый *опорным*. Относительно него наблюдают, как меняется фаза модулированного сигнала. Модулирующий, модулированный и опорный сигналы показаны на рис. 3.5.

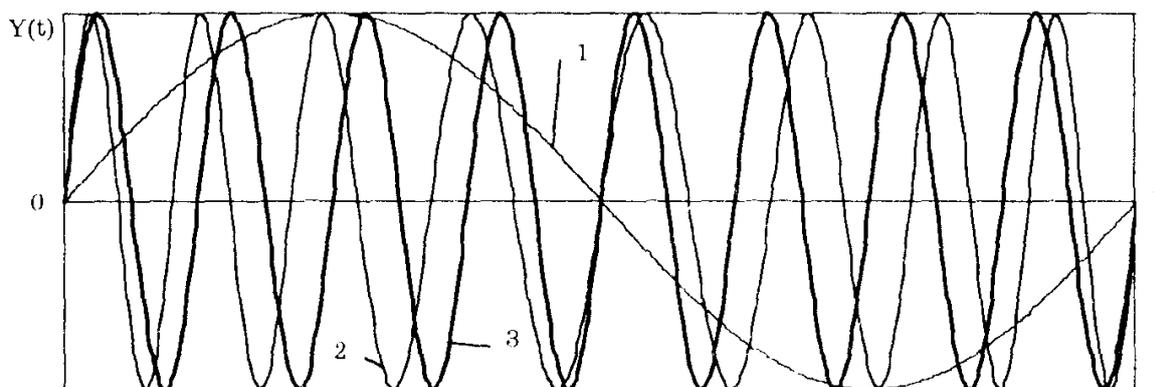


Рис. 3.5. Сигналы: 1 – модулирующий; 2 – фазомодулированный; 3 – опорный

Если модулируемый сигнал представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов, то возможны три вида модуляции (рис. 3.6):

- амплитудно-импульсная (АИМ);
- частотно-импульсная (ЧИМ);
- широтно-импульсная (ШИМ).

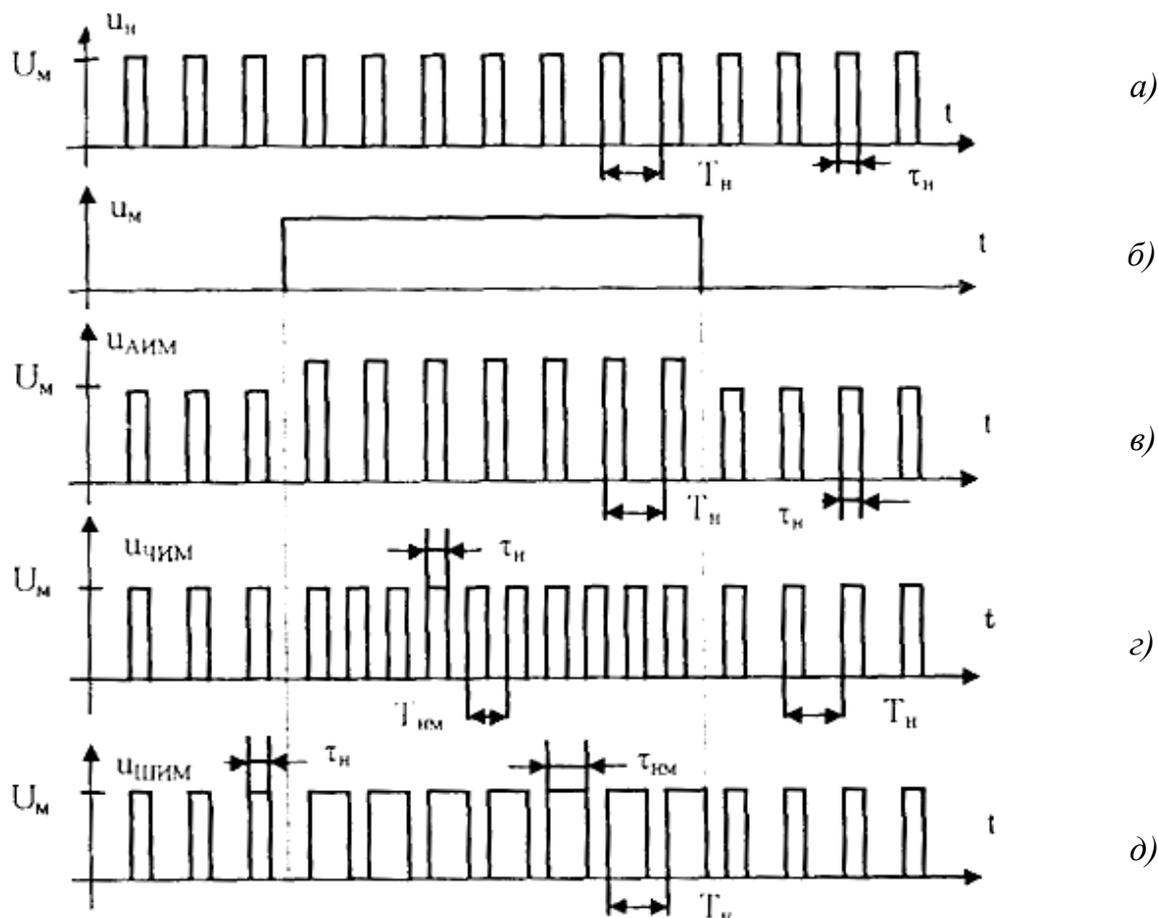


Рис. 3.6. Сигналы: а – несущая последовательность прямоугольных импульсов; б – модулирующий; в – амплитудно-модулированный; г – частотно-модулированный; д – широтно-модулированный

При этом параметры, несущие измерительную информацию, – соответственно амплитуда, частота и длительность импульсов.

*Измерительные генераторы (автогенераторы)* – источники сигналов различных форм и частот, предназначенные для работы с радиоэлектронными схемами.

В зависимости от формы выходных сигналов различают генераторы гармонических и релаксационных (импульсных) колебаний. В спектре сигнала генератора гармонических колебаний есть одна или несколько гармоник.

По частотному диапазону генераторы делятся на инфранизкочастотные (0,01...20 Гц), низкочастотные, или генераторы звукового диапазона (20...300 000 Гц), генераторы высоких частот (0,3...300 МГц), сверхвысокочастотные (СВЧ, свыше 300 МГц). Особую группу представляют генераторы случайных колебаний (сигналов), или шумовые. Следует отметить и генераторы линейно-изменяющихся напряжений (ГЛИН), которые относят к релаксационным. Такие генераторы используют как измерительные и как генераторы 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.

Вначале, после включения питания генератора, возникший в колебательной системе сигнал усиливается 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, которую усилитель схем отбирает от источника постоянного тока 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. 3.7), состоящей из нелинейного резонансного усилителя с комплексным коэффициентом усиления  $K = K(j\omega)$  и цепи положи-

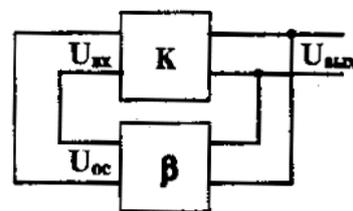


Рис. 3.7. Обобщенная структурная схема генератора

тельной обратной связи (ОС) с комплексным коэффициентом передачи по напряжению  $\beta = \beta(j\omega)$ . В представленной схеме отмечены комплексные амплитуды следующих напряжений: входного –  $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}(j\omega)$ ; выходного –  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}(j\omega)$  и обратной связи –  $U_{\text{ос}} = U_{\text{ос}}(j\omega)$ .

Выражение для напряжения обратной связи на любой частоте генерации запишем в виде

$$U_{\text{ос}} = U_{\text{вх}} = \beta U_{\text{вых}}. \quad (3.3)$$

Тогда выходное напряжение определяется как  $U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}}$  или с учетом (3.3) как

$$U_{\text{вых}} = K\beta U_{\text{вых}}. \quad (3.4)$$

Как следует из соотношения (3.4), автогенератор будет работать в стационарном режиме при условии, что  $K\beta = 1$ .

В генераторах гармонических колебаний колебательными системами служат резонансные LC-контур (в СВЧ-генераторах для этих целей используют резонаторные системы) и частотно-зависимые (фазирующие) RC-цепи. Генераторы гармонических колебаний с LC-контуром называют 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 единиц герц до десятков килогерц).

Обобщенные структурные схемы измерительных генераторов гармонических сигналов типа ГС и ГСС представлены на рис. 3.8. В регенераторах, для которых выполняются условия балансов амплитуд и фаз, частота в основном определяется резонансом колебательного контура, как это показано, например на рис. 3.9, а. Частота колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.5)$$

К LC-генераторам относят и генераторы с кварцевой стабилизацией частоты. Этот способ стабилизации основан на применении вместо LC-контуров кварцевого резонатора, что снижает нестабильность частоты до  $10^{-7}$  (отклонение частоты на  $\Delta f = 0,1$  Гц от генерируемой  $f = 1$  МГц).



Рис. 3.8. Обобщенные структурные схемы измерительных генераторов: а – генератора сигнала; б – генератора стандартных сигналов

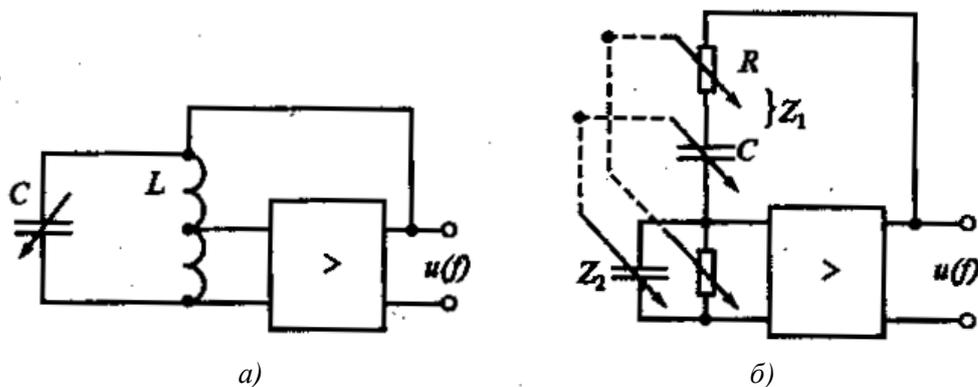


Рис. 3.9. Структурные схемы: а – LC-генератора; б – RC-генератора

Кварцевый резонатор (кварц) представляет собой помещенную в кварцедержатель тонкую прямоугольную пластинку минерала кварца определенного размера, грани которой ориентированы к осям кристалла.

Кварц обладает прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом (пьезоэффектом). Прямой пьезоэффект возникает при механическом сжатии (растяжении) кварцевой пластинки и сопровождается появлением на ее противоположных гранях электрических зарядов.

В измерительных генераторах гармонических колебаний чаще применяются схемы с RC-цепями, обычно с мостом Вина (см. рис. 3.9, б), который осуществляет сдвиг фазы сигнала на  $180^\circ$ .

Схему генератора строят на основе усилителя, у которого в широком диапазоне частот коэффициент передачи  $K$  – вещественная величина, а фазовый сдвиг  $\varphi = 2\pi$  обеспечивается за счет моста Вина и инверсии сигнала в каскадах усиления. Для выполнения условия (см. рис. 3.7) необходимо, чтобы коэффициент передачи цепи положительной обратной связи  $\beta$  также был величиной вещественной.

Из схемы рис. 3.9, б видно, что коэффициент  $\beta$  представляет собой отношение

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.6)$$

где  $Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}$ .

В практических схемах автогенераторов применяют усилитель с большим коэффициентом усиления  $K$ , но для стабилизации частоты используют дополнительную цепь отрицательной обратной связи.

Генераторы звукового диапазона частот (низкочастотные) 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 включается согласующий трансформатор, например, на нагрузки 60, 600, 6000 Ом.

Для повышения стабильности частоты таких схем измерительных генераторов часто применяют задающие генераторы на биениях. Упрощенная структурная схема такого генератора представлена на рис. 3.10.

Колебания низкой частоты образуются в генераторе путем смешивания двух близких по частоте высокочастотных колебаний  $f_1$  и  $f_2$  в преобразователе (на рис. 3.10 для упрощения отображен только смеситель). При этом частота  $f_2$  может меняться 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 промежуточных (или нижних) частот.

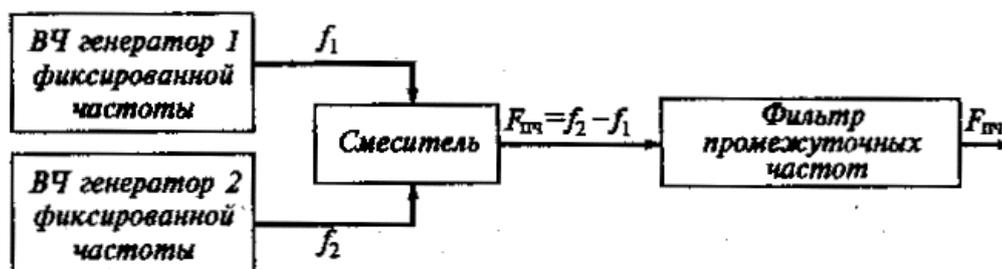


Рис. 3.10. Упрощенная структурная схема генератора на биениях

В диапазоне радиочастот в измерительных системах используются как генераторы сигналов, так и генераторы стандартных сигналов. Генераторы сигналов имеют большую среднюю мощность выходного сигнала (до 3 Вт) и применяются для питания измерительных передающих антенн и других мощных устройств. Генераторы стандартных сигналов – маломощные источники сигнала с низким уровнем выходного напряжения (до 1 В) – оказываются полезны при испытаниях и настройке узлов радиоаппаратуры.

В генераторах стандартных сигналов предусмотрена возможность получения амплитудной модуляции за счет использования как внешнего, так и внутреннего источников напряжения. Внутренняя модуляция обычно имеет частоты 400 и 1000 Гц.

### Порядок выполнения работы

1. Познакомиться с устройством генератора стандартных сигналов Г4-18 и осциллоскопа СQ5010В. Включить приборы.
2. Получить у преподавателя задание, в соответствии с которым установить выходные параметры сигнала генератора Г4-18.
3. Выполнить калибровку осциллоскопа СQ5010В в соответствии с инструкцией по эксплуатации (прил. 1).
4. Измерить основные параметры амплитудно-модулированного сигнала, пользуясь осциллоскопом СQ5010В:
  - частоту и амплитуду несущего сигнала;
  - частоту и амплитуду моделирующего сигнала;
  - коэффициент модуляции.

### Форма отчета

Отчет должен содержать:

1. Эпюры напряжений, наблюдаемые на экране осциллоскопа СQ5010В.

2. Цифровые параметры амплитудно-моделирующего сигнала.
3. Оценку погрешностей измерения.
4. Ответы на контрольные вопросы (по указанию преподавателя).

## **Литература**

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебник / В. И. Нефедов [и др.]. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

## **Контрольные вопросы**

1. Чем измерительный сигнал отличается от обычного? Приведите примеры измерительных сигналов, используемых в различных разделах науки и техники.
2. Перечислите признаки, по которым классифицируют измерительные сигналы.
3. Чем аналоговый, дискретный и цифровой сигналы отличаются друг от друга?
4. Что такое помехи, как они классифицируются? Приведите примеры помех.
5. Какие типы математических моделей измерительных сигналов используют в метрологии?
6. Сколько и каких параметров нужно знать для описания каждого из элементарных измерительных сигналов?
7. Что такое амплитудная, частотная и фазовая модуляции?
8. Что такое амплитудно-импульсная, частотно-импульсная и широтно-импульсная модуляции?
9. Дайте определение операции квантования. Где и каким образом ее используют в метрологии? Что такое погрешность квантования?
10. Дайте определение дискретизации. Расскажите о том, как проводят дискретизацию измерительных сигналов. Что утверждает теорема Котельникова?
11. Какие интегральные параметры используют для описания переменных сигналов?
12. Перечислите возможные проявления погрешностей.
13. Изменяется или нет частота фазомодулированного сигнала?
14. Поясните управление осциллографом CQ5010B.

## Лабораторная работа № 4

### ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ

**Цель работы:** ознакомиться с основными параметрами надежности средств измерений, методами их выявления; освоить практические навыки проведения поверки.

**Оборудование:**

1. Амперметр Д566 ( $K_{ТА} = 0,2$ ).
2. Амперметр Э86 ( $K_{ТА} = 0,5$ ).
3. Реостат (15 Ом, 10 А).

#### Теоретическая часть

В процессе эксплуатации метрологические характеристики (МХ) и параметры средств измерений претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный, монотонный или флуктуирующий характер и приводят к отказам, т. е. невозможности СИз выполнять свои функции. Отказы делят на неметрологические и метрологические.

*Неметрологическим* называют отказ, обусловленный причинами, не связанными с изменением МХ средства измерений. Они носят главным образом явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения поверки.

*Метрологическим* называют отказ, вызванный выходом МХ из допустимых границ. Как показывают проведенные исследования, метрологические отказы происходят значительно чаще, чем неметрологические. Это обуславливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения. Метрологические отказы подразделяют на внезапные и постепенные.

*Внезапным* называют отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т. п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, т. е. по характеру проявления они явные. Особенность внезапных отказов – постоянство во времени их интенсивности.

*Постепенным* называют отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы относят к скрытым: их можно выявить только по результатам периодического контроля СИз. В дальнейшем авторы рассматривают именно такие отказы.

С понятием «метрологический отказ» тесно связано понятие *метрологической исправности* средства измерений. Под ней понимается состояние СИз, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям. Способность СИз сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации называют *метрологической надежностью*. Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической теории надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным. Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособным и неработоспособным. Постепенное изменение погрешности СИз позволяет ввести сколько угодно много работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования, определяемым степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям.

Понятие метрологического отказа в известной степени условно, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий. Важно и то, что зафиксировать точное время наступления метрологического отказа ввиду скрытого характера его проявления невозможно, в то время как явные отказы, с которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения. Все это потребовало разработки специальных методов анализа метрологической надежности СИз.

Надежность СИз характеризует их поведение с течением времени и представляет собой обобщенное понятие, включающее в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых СИз) и сохраняемость.

*Стабильность* СИз – это качественная характеристика, отражающая неизменность во времени его МХ. Ее описывают временные зависимости параметров закона распределения погрешности. Метроло-

гические надежность и стабильность – различные свойства одного и того же процесса старения СИз. Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средства измерений. Это как бы его «внутреннее» свойство. Надежность, наоборот, считается «внешним» свойством, поскольку зависит как от стабильности, так и от точности измерений и значений используемых допусков.

*Безотказность* – это свойство СИз непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: работоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ – это случайное событие, связанное с нарушением или прекращением работоспособности СИз. Это обуславливает случайную природу показателей безотказности, главный из которых – распределение времени безотказной работы СИз.

*Долговечность* – это свойство СИз сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния. *Работоспособное состояние* – это такое состояние СИз, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям. *Предельным* называют состояние СИз, при котором его применение недопустимо.

Свойство СИз сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования называют его *сохраняемостью*.

После метрологического отказа характеристики СИз путем соответствующих регулировок могут быть возвращены в допустимые диапазоны. Процесс проведения регулировок может быть более или менее длительным в зависимости от характера метрологического отказа, конструкции СИз и ряда других причин, поэтому в характеристику надежности введено понятие «ремонтпригодность». *Ремонтпригодность* – свойство СИз, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и средств на восстановление СИз после метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии.

Метрологические характеристики СИз могут изменяться в процессе эксплуатации. В дальнейшем будем говорить об измерениях погрешности  $\Delta(t)$ , подразумевая, что вместо нее можно аналогичным образом рассмотреть любую другую МХ.

Следует отметить, что не все составляющие погрешности подвержены изменению во времени. Например, методические погрешности зависят только от используемой методики измерения. Среди инструментальных погрешностей есть много составляющих, практически не подверженных старению, например размер кванта в цифровых приборах и определяемая им погрешность квантования.

Изменение МХ средств измерений во времени обусловлено процессами старения в его узлах и элементах, вызванными взаимодействием с внешней окружающей средой. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИз в эксплуатации или хранится на консервации. Следовательно, основной фактор, определяющий старение СИз – это календарное время, прошедшее с момента их изготовления, т. е. возраст. Скорость старения зависит прежде всего от используемых материалов и технологий. Исследования показали, что необратимые процессы, изменяющие погрешность, протекают очень медленно, и зафиксировать эти изменения в ходе эксперимента в большинстве случаев невозможно. В связи с этим большое значение приобретают различные математические методы, на основе которых строят модели изменения погрешностей и прогнозируют метрологические отказы.

Задача, решаемая при определении метрологической надежности СИз, состоит в нахождении начальных изменений МХ и построении математической модели, экстраполирующей полученные результаты на большой интервал времени. Поскольку изменение во времени – случайный процесс, то основным инструментом построения математических моделей становится теория случайных процессов.

Изменение погрешности СИз во времени представляет собой нестационарный случайный процесс.

В общем виде модель погрешности  $\Delta_{0,95}(t)$  может быть представлена в виде  $\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + F(t)$ , где  $\Delta_0$  – начальная погрешность СИз;  $F(t)$  – случайная для совокупности СИз данного типа функция времени, обусловленная физико-химическими процессами постепенного износа и старения элементов и блоков. Получить точное выра-

жение для функции  $F(t)$  исходя из физических моделей процессов старения практически не представляется возможным. Поэтому, основываясь на данных экспериментальных исследований изменения погрешностей во времени, функцию  $F(t)$  аппроксимируют той или иной математической зависимостью.

Простейшей моделью изменения погрешности предстает линейная:

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + vt, \quad (4.1)$$

где  $v$  – скорость изменения погрешности. Как показали проведенные исследования, данная модель удовлетворительно описывает старение СИЗ в возрасте от одного до пяти лет.

Метрологические отказы возникают периодически. Механизм их периодичности иллюстрирует рис. 4.1, а, где прямой линией 1 показано изменение 95%-ного квантиля при линейном законе.

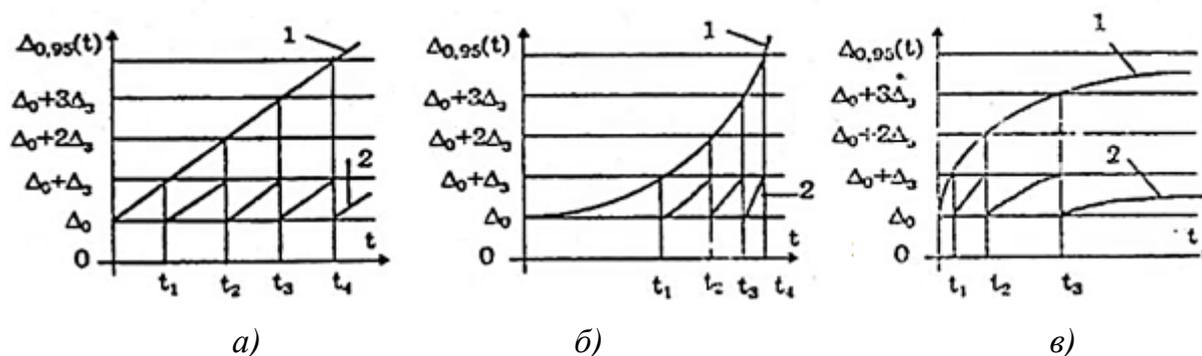


Рис. 4.1. Законы изменения погрешности: а – линейный; б, в – экспериментальный

При метрологическом отказе погрешность  $\Delta_{0,95}(t)$  превышает значение  $\Delta_{пр} = \Delta_0 + \Delta_3$ , где  $\Delta_3$  – значение запаса нормируемого предела погрешности, необходимого для обеспечения долговременной работоспособности СИЗ. При каждом таком отказе прибор ремонтируют, и его погрешность возвращается к исходному значению  $\Delta_0$ . По прошествии времени  $T_p = t_i - t_{i-1}$  опять происходит отказ (моменты  $t_1, t_2, t_3$  и т. д.), после которого вновь производят ремонт. Следовательно, процесс изменения погрешности СИЗ описывается ломаной линией 2 на рис. 4.1, а, которая может быть представлена уравнением

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + n\Delta_3, \quad (4.2)$$

где  $n$  – число отказов (или ремонтов) СИЗ.

Частота метрологических отказов увеличивается с ростом скорости  $\nu$ . Она столь же сильно зависит от запаса нормируемого значения погрешности  $\Delta_3$  по отношению к фактическому значению погрешности средства измерений  $\Delta_0$  на момент изготовления или окончания ремонта прибора. Практические возможности воздействия на скорость изменения  $\nu$  и запас погрешности  $\Delta_3$  совершенно различны. Скорость старения определяют существующей технологией производства. Запас погрешности для первого межремонтного интервала зависит от решений, принятых производителем СИЗ, а для всех последующих межремонтных интервалов – уровнем культуры ремонтной службы пользователя.

В реальности для одних приборов межремонтные интервалы уменьшаются, для других – увеличиваются. Это можно объяснить тем, что погрешность СИЗ с течением времени экспоненциально возрастает или убывает. При ускоряющемся возрастании погрешности (см. рис. 4.1, б) каждый последующий межремонтный интервал короче предыдущего и частота метрологических отказов  $\omega(t)$  с течением времени увеличивается. При замедленном возрастании погрешности (см. рис. 4.1, в) каждый последующий межремонтный интервал длиннее предыдущего и частота метрологических отказов  $\omega(t)$  с течением времени убывает вплоть до нуля.

Для рассмотренных случаев изменения погрешности во времени описывают на основе экспоненциальной модели. В ней частота метрологических отказов

$$\omega(t) = \omega_0 e^{at}, \quad (4.3)$$

где  $\omega_0$  – частота метрологических отказов на момент изготовления средства измерений (т. е. при  $t = 0$ ), год<sup>-1</sup>;  $a$  – положительное или отрицательное ускорение процесса метрологического старения, год<sup>-1</sup>.

Число отказов  $n(t)$  определяется через частоту отказов  $\omega(t)$  и при её экспоненциальном изменении согласно формуле (4.3) рассчитывается как  $n(t) = \int \omega(t) dt = \int \omega_0 e^{at} dt = \omega_0 / a (e^{at} - 1)$ .

Тогда изменение во времени погрешности СИЗ с учетом формулы (4.2) имеет вид

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + n\Delta_3 = \Delta_0 + \Delta_3 \omega_0 / a (e^{at} - 1). \quad (4.4)$$

Указанная зависимость показана кривыми  $I$  на рис. 4.1, б и в.

Практическое использование формулы (4.4) требует знания четырех параметров: начального значения погрешности ( $\Delta_0$ ), абсолютно-

го запаса погрешности ( $\Delta_3$ ), начальной частоты метрологических отказов ( $\omega_0$ ) при  $t = 0$  и ускорения ( $a$ ) процесса старения. Уравнения для определения названных параметров, получаемые из (4.4), оказываются трансцендентными, что существенно затрудняет их применение.

С целью упрощения использования уравнения (4.4) необходимо разложить в ряд экспоненциальную функцию и взять три первых члена этого разложения. В результате зависимость погрешности СИЗ от времени будет представлена в виде

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + \Delta_3 \omega_0 t + \Delta_3 \omega_0 a t^2 / 2 = \Delta_0 + vt + a_{\Delta} t^2 / 2, \quad (4.5)$$

где  $v$  – начальная скорость возрастания погрешности, %;  $a_{\Delta}$  – абсолютное значение ускорения изменения погрешности, %. В частном случае, когда  $a = 0$ , (4.5) превращается в линейное уравнение вида (4.1).

Выражение (4.5) имеет ясный физический смысл и позволяет путем аппроксимации экспериментальных данных о погрешностях СИЗ за 10 – 15 лет получить оценки коэффициентов  $v$  и  $a$ , а по ним рассчитать параметры уравнения (4.4) в виде  $\omega_0 = v/\Delta_3$  и  $a = a_{\Delta}/(\Delta_3 \omega_0)$ .

Расчет времени наступления метрологического отказа сводится к определению моментов пересечения кривой  $\Delta_{0,95}(t)$  постоянных уровней  $\Delta_0 + \Delta_3$ ,  $\Delta_0 + 2\Delta_3$ , ...,  $\Delta_0 + n\Delta_3$ . Их можно найти путем совместного решения уравнений (4.2) и (4.4). Момент наступления  $n$ -го отказа и, соответственно, длительность межремонтных периодов можно определить по формулам

$$t_n = \frac{1}{a} \ln\left(\frac{an}{\omega_0} + 1\right); \quad T_n = \frac{1}{a} \ln\left(1 - \frac{1}{\frac{\omega_0}{a} + n}\right) \quad (4.6)$$

*Срок службы СИЗ* – это календарное время, прошедшее с момента его изготовления до конца эксплуатации. При положительном ускорении процесса старения (см. рис. 4.1, б) частота отказов с увеличением срока службы возрастает, и по истечении времени  $T_n$  СИЗ приходится настолько часто ремонтировать, что эксплуатация становится экономически невыгодной, так как дешевле купить новый прибор. Экономическая целесообразность ремонта определяется отношением средней стоимости одного ремонта  $c_p$  к стоимости  $c_n$  нового средства измерений, названного относительной глубиной ремонта  $c = c_p / c_n$ . Срок службы СИЗ

$$T_{сл} = \frac{1}{\sqrt{c\omega_0 a}}. \quad (4.7)$$

Решая полученное уравнение совместно с первым выражением из (4.6), можно рассчитать общее число отказов (а значит, и ремонтов) СИЗ в течение срока эксплуатации.

В технике используют большое число показателей надежности, которые приведены в стандарте ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения». Рассмотрим основные из них, нашедшие применение в теории метрологической надежности. Знание показателей метрологической надежности позволяет потребителю оптимально использовать СИЗ, планировать мощности ремонтных участков, размер резервного фонда приборов, обоснованно назначать межповерочные интервалы и грамотно проводить мероприятия по техническому обслуживанию СИЗ.

Стабильность СИЗ характеризуется плотностью распределения приращения погрешности  $\Delta[\Delta(t)] = \Delta_{0,95}(t) - \Delta_0$ .

Среди показателей безотказности наибольшее распространение получили вероятность безотказной работы, средняя и гамма-процентная наработка до отказа и интенсивность отказов. *Вероятность безотказной работы СИЗ  $P(t)$*  – это вероятность того, что в течение времени  $t$  нормированные МХ не выйдут за допускаемые пределы, т. е. не наступит метрологический отказ. *Наработкой* называют продолжительность работы СИЗ, а *наработкой до отказа* – продолжительность работы от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Вероятность  $P(t)$  – функция времени, которая задается аналитически или графиком. Например, если вероятность безотказной работы в течение 1000 ч составляет  $P(t) = 0,97$ , то это означает, что в среднем из большого числа СИЗ данного типа около 97 % проработают более 1000 ч. Вероятность  $P(t)$  изменяется от нуля до единицы. Чем она ближе к единице, тем выше безотказность работы СИЗ. На практике допустимым считается значение  $P(t) \geq 0,9$ . Вероятность безотказной работы СВ в интервале от 0 до  $t$  определяют по формуле

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t p_n(t)dt = \int_t^\infty p_n(t)dt,$$

где  $F(t)$ ,  $p_n(t)$  – интегральная и дифференциальная функции распределения наработки на отказ;  $Q(t)$  – вероятность отказа.

*Средней наработкой до отказа* называют математическое ожидание наработки СИЗ до первого отказа:

$$t_{cp} = \int_0^\infty tp_n(t)dt.$$

*Гамма-процентная наработка до отказа* – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью, выраженной в процентах. Она определяется из уравнения

$$P(t_\gamma) = 1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} p_n(t)dt = \gamma/100.$$

При  $\gamma = 100$  % гамма-процентная наработка называется уставленной безотказной, а при  $\gamma = 50$  % – медианной.

*Частота (интенсивность) отказов* определяется как условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого СИЗ, которую находят для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник следующим образом:

$$\omega(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{p_n(t)}{P(t)} = p_n(t) / \int_t^\infty p_n(t)dt. \quad (4.8)$$

Вероятность безотказной работы выражают через интенсивность отказов:

$$P(t) = \exp(-\int_0^t \omega(t)dt).$$

Из теории надежности известно, что при постепенных отказах, к которым относятся и метрологические, плотность распределения наработки на отказ рассредоточивается в основном по одному из четырех законов: экспоненциальному, нормальному, логнормальному и закону Вейбулла. Выбор того или иного закона необходимо производить только на основе экспериментальных исследований. При нормальном законе

$$P_n(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t - T_{cp})^2 / (2\sigma^2)],$$

где  $T_{cp}$ ,  $\sigma$  – параметры распределения. В этом случае

$$P(t) = 1 - \Phi[(t - T_{cp}) / \sigma],$$

где  $\Phi(z)$  – функция Лапласа.

Интенсивность отказов описывают выражением, полученным с помощью формулы (4.8):

$$\omega(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t - T_{cp})^2 / (2\sigma^2)] / \{1 - \Phi[(t - T_{cp}) / \sigma]\}.$$

Для использования этих формул необходимо знать средний срок службы  $T_{cp}$  и его среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma$ , которые находятся экспериментально при испытаниях СИЗ на надежность.

Основные показатели долговечности – средние и гамма-процентные сроки службы и ресурсы. *Срок службы* – это календарная продолжительность работы СИЗ от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Его измеряют в годах или месяцах.

*Средним сроком службы* называют математическое ожидание срока службы

$$T_{\text{сл}} = \int_0^{\infty} t f_{\text{сл}}(t) dt,$$

где  $f_{\text{сл}}(t)$  – плотность распределения срока службы для совокупности СИЗ данного типа.

*Гамма-процентный срок службы* – это календарная продолжительность от начала эксплуатации СИЗ, в течение которой оно не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $y$ , выраженной в процентах. Этот срок определяется из уравнения

$$P(T_{\text{сл}}) = 1 - \int_0^{T_{\text{сл}}} f_{\text{сл}}(t) dt = \frac{y}{100}$$

*Ресурсом* называют наработку СИЗ от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Ресурс представляет собой запас возможной наработки СИЗ. *Средним ресурсом* обозначают математическое ожидание ресурса

$$T_{\text{р}} = \int_0^{\infty} t f_{\text{р}}(t) dt,$$

где  $f_{\text{р}}(t)$  – плотность распределения ресурса для совокупности СИЗ данного типа.

*Гамма-процентный ресурс* – это наработка, в течение которой средство измерений не достигнет своего предельного состояния с заданной вероятностью  $y$ , выраженной в процентах. Он определяется из уравнения

$$P(T_{\text{р},y}) = 1 - \int_0^{T_{\text{р},y}} f_{\text{р}}(t) dt = \frac{y}{100}.$$

Срок службы (средний или гамма-процентный) акцентирует внимание на календарной продолжительности эксплуатации, включая в себя, помимо времени непосредственной работы СИЗ, время хранения его на складе, нахождения в выключенном состоянии, транспортировку, ремонт и т. д. При нормировании его задают в годах. Ресурс (средний или гамма-процентный) представляет собой чистую наработку изделия, находящегося во включенном состоянии, и нормируется в часах.

В качестве показателей ремонтпригодности используют вероятность и среднее время восстановления работоспособности СИЗ. *Вероятностью восстановления работоспособного состояния* называют вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния СИЗ не превысит заданного значения. Она представляет собой значение функции распределения времени восстановления при  $t = T_{\text{зад}}$ , где  $T_{\text{зад}}$  – заданное время восстановления. *Средним временем*

*восстановления* работоспособного состояния называют математическое ожидание времени восстановления, определяемое по его функции распределения.

Одна из основных форм поддержания СИз в метрологически исправном состоянии – его периодическая поверка. Ее проводят метрологические службы согласно правилам, изложенным в специальной нормативно-технической документации. Периодичность поверки должна быть согласована с требованиями к надежности СИз. Поверку необходимо проводить через оптимально выбранные интервалы времени, называемые *межповерочными интервалами* (МПИ).

Момент наступления метрологического отказа может выявить только поверка СИз, результаты которой позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Величина МПИ должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие – к повышению погрешности измерений из-за метрологических отказов.

Межповерочные интервалы устанавливают в календарном времени для СИз, изменение метрологических характеристик которых обусловлено старением и не зависит от интенсивности эксплуатации. Значения МПИ рекомендуется выбирать из следующего ряда: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12;  $6K$  месяцев, где  $K$  – целое положительное число. Для СИз, у которых изменение  $MX$  – следствие износа его элементов, зависящего от интенсивности эксплуатации, МПИ назначаются в значениях наработки.

При нахождении МПИ выбирают  $MX$ , определяющую состояние метрологической исправности средства измерений. В качестве таких характеристик, как правило, используют основную погрешность, СКО случайной составляющей погрешности и некоторые другие. Если состояние метрологической исправности определяют несколько  $MX$ , то из них выбирают ту, по которой обеспечивается наибольший процент брака при поверках.

В настоящее время существуют три основных пути определения МПИ:

- на основе статистики отказов;
- на основе экономического критерия;
- произвольное назначение первоначального МПИ с последующей корректировкой в течение всего срока службы СИз.

Выбор конкретного метода определения продолжительности МПИ зависит от наличия исходной информации о надежности и стабильности СИз. Первый способ эффективен при условии, что известны показатели метрологической надежности. Наиболее полная информация такого рода содержится в моделях, описывающих изменение во времени МХ средств измерений.

Применение методов расчета МПИ, основанных на статистике скрытых и явных отказов, требует наличия большого количества экспериментальных данных по процессам изменения во времени МХ средств измерений различных типов.

Определение межповерочного интервала по экономическому критерию состоит в решении задачи по выбору такого интервала, при котором можно минимизировать расходы на эксплуатацию СИз и устранить последствия от возможных ошибок, вызванных погрешностями измерения. Исходной информацией для определения МПИ служат данные о стоимости поверки и ремонта СИз, а также об ущербе от изъятия его из эксплуатации и использования метрологически неисправного прибора.

Один из вариантов определения МПИ по экономическому критерию приведен в рекомендации МИ 2187-92 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений».

Наиболее универсален метод, состоящий в произвольном назначении МПИ с последующей корректировкой его величины. В этом случае при минимальной исходной информации назначают первоначальный интервал, а результаты последующих поверок представляют собой исходные данные для его корректировки.

Основная трудность данного метода – назначение первого МПИ. Преодолеть ее возможно тремя путями. Во-первых, для определения протяженности первого МПИ можно использовать показатели метрологической надежности поверяемого СИз. Во-вторых, длительность первого интервала можно оценить исходя из анализа данных по эксплуатации аналогичных поверяемому по конструкции и технологии производства СИз. В-третьих, первый МПИ выбирают в соответствии с рекомендациями нормативных документов государственных и ведомственных метрологических служб.

Данный метод рассмотрен в рекомендации МИ 1872-88 «ГСИ. Межповерочные интервалы образцовых средств измерений. Методика определения и корректировки» и в международном стандарте ИСО 10012-1 «Требования, гарантирующие качество измерительного оборудования».

Правильная передача размера единиц физических величин (ФВ) во всех звеньях метрологической цепи обеспечивается посредством поверочных схем. *Поверочная схема* – это нормативный документ, который определяет соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим СИз с указанием методов и погрешности, и утвержден в установленном порядке. Основные положения о поверочных схемах приведены в ГОСТ 8.061-80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение». Поверочные схемы делят на государственные, ведомственные и локальные.

- *Государственная поверочная схема* распространяется на все СИз данной ФВ, имеющиеся в стране. Она разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу.

- *Ведомственная поверочная схема* распространяется на СИз данной ФВ, подлежащие ведомственной поверке.

- *Локальная поверочная схема* распространяется на СИз данной ФВ, подлежащие поверке в отдельном органе метрологической службы.

Ведомственные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам для СИз одних и тех же ФВ. Их можно составить при отсутствии государственной поверочной схемы. В них допускается указывать конкретные типы (экземпляры) СИз.

Правила расчета параметров поверочных схем и оформления чертежей поверочных схем приведены в ГОСТ 8.061-80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение» и в рекомендациях МИ 83-76 «Методика определения параметров поверочных схем».

*Поверка* – это операция, заключающаяся в установлении пригодности СИз к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и контроля их соответствия предъявляемым требованиям. Основная метрологическая характеристика, определяемая при поверке СИз, – его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого СИз с более точным СИз –

рабочим эталоном. Различают поверки: государственную и ведомственную, периодическую и независимую, внеочередную и инспекционную, комплексную, поэлементную и др.

Основные требования к организации и порядку проведения поверки СИз приведены в правилах по метрологии ПР 50.2.006-94 «ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения», а также в рекомендациях МИ 187-86 «ГСИ. Критерии достоверности и параметры методик поверки» и МИ 188-86 «ГСИ. Установление значений методик поверки».

Поверку выполняют метрологические службы, которым дано на это право. Средство измерений, признанное годным к применению, оформляется с выдачей свидетельства о поверке, нанесением поверительного клейма или иными способами, устанавливаемыми в нормативно-технических документах.

Поверка измерительных приборов проводится двумя методами:

- непосредственным сравнением измеряемых величин и величин, воспроизводимых образцовыми мерами соответствующего класса точности. Значения величин на выходе мер выбирают равными оцифрованным отметкам шкалы прибора. Наибольшая разность между результатами измерения и соответствующими им размерами мер предстает в этом случае основной погрешностью прибора;

- непосредственным сличением показаний поверяемого и некоторого образцового прибора при измерении одной и той же величины. Основой данного метода служит одновременное измерение одного и того же значения ФВ поверяемым и образцовым СИз. Разность показаний этих приборов равна абсолютной погрешности поверяемого средства измерений.

Существуют и другие методы поверки, которые, однако, используются гораздо реже.

При поверке важен выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями образцового и поверяемого СИз. Обычно, когда при поверке вводят поправки на показания образцовых средств измерений, это соотношение принимают равным 1:3 (исходя из критерия ничтожно малой погрешности). Если же поправки не вводят, то образцовые СИз выбирают из соотношения 1:5.

## Порядок выполнения работы

1. Собрать поверочную схему, соблюдая полярность:



2. Установить:

- диапазон измерения Д566;
- диапазон измерения Э86;
- нулевое положение стрелок, пользуясь корректорами.

3. Выполнить эксперимент. Предварительно установить ручки регулирования выходного напряжения ВСП-30 «ГРУБО» и «ПЛАВНО» в крайнее левое положение.

Включить источник питания ВСП-30. Плавно регулируя выходное напряжение, последовательно устанавливая стрелку поверяемого амперметра Э86 на каждое оцифрованное деление. Результаты измерений оформить в виде таблицы.

№ п/п	Измерено		Вычислено		
	1,А Э86 $X_i$	1,А Д566 $Q_i$	Абсолютная погрешность $(X_i - Q_i)$	Относительная погрешность $\sigma_{xi}$	Допустимая относительная погрешность
1	0,3				
2	0,4				
3	0,6				
4	0,8				
5	1				
6	1,2				

4. Вычислить допустимую относительную погрешность измерения поверяемого амперметра, зная класс точности амперметра Э86  $k_{TA} = 0,5$ .

Допустимая относительная погрешность измерения в произвольной точке  $X_i$  шкалы должна быть не более

$$\sigma X_k = \frac{\Delta X_k}{X_i},$$

где  $\Delta X$  – абсолютная погрешность, находится по  $k_{TA}$

$$\Delta X_k = X_{кТА} / 100,$$

где  $X = 1,2 \text{ А}$  – верхнее значение диапазона измерения.

5. Вычислить фактическую абсолютную погрешность измерения поверяемым амперметром

$$\Delta = X_i - Q_i,$$

где  $Q_i$  – истинное значение тока (показания образцового амперметра).

6. Вычислить относительную погрешность измерения поверяемым амперметром

$$\sigma_{xi} = \frac{\Delta}{X_i}.$$

7. Сформулировать вывод о пригодности поверяемого амперметра для дальнейшей эксплуатации.

### **Форма отчета**

Отчет должен содержать:

1. Поверочную схему.
2. Результаты измерений и вычислений по пп. 3 – 6 порядка выполнения работы.
3. Ответы на контрольные вопросы (по указанию преподавателя).

### **Литература**

Сергеев, А. Г. Метрология : учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М. : Логос, 2000. – 408 с. – ISBN 5-94010-039-2.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое поверочная схема и для чего она предназначена? Какие существуют виды поверочных схем?
2. Что такое поверка средств измерений и какими способами ее можно проводить?
3. Назовите нормативные документы, в которых рассматриваются вопросы выбора межповерочных интервалов.
4. Сформулируйте определение метрологической исправности средства измерений.

5. Что такое отказ? Чем отличается метрологический отказ от неметрологического?

6. Чем вызвано изменение во времени метрологических характеристик средств измерений? Каким образом можно математически описать эти изменения?

7. Что называется межповерочным интервалом?

8. Какие способы выбора межповерочных интервалов существуют?

9. Что такое метрологическая надежность средств измерений?

10. Сформулируйте определение единицы физической величины. Приведите примеры единиц физических величин, относящихся к дисциплине «Электрорадиоизмерения».

11. Дайте определения системы физических величин и системы единиц физических величин. Приведите примеры основных и производных физических величин и единиц.

12. Что такое класс точности прибора?

13. Назовите основные показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости средств измерений.

14. Что такое линейная модель изменения погрешности во времени?

15. Что такое экспоненциальная модель изменения погрешности во времени?

16. Сформулируйте определения стабильности, безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости средств измерений.

## Лабораторная работа № 5 ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Цель работы:** ознакомиться с существующими методами измерения частоты переменного тока и освоить практические навыки определения этого параметра.

### **Оборудование:**

1. Осциллоскоп CQ5010B.
2. Генератор сигналов ГЗ-33 № 8598.
3. Генератор сигналов ГЗ-33 № 6852.

### **Теоретическая часть**

*Частотой  $f$*  называется число идентичных событий, происходящих в единицу времени. Единица *циклической (собственной) частоты  $f$*  – герц (Гц) – соответствует одному событию за 1 с. Традиционно в радиоэлектронике высокие частоты принято обозначать буквой  $f$ , а низкие –  $F$ . Гармонические сигналы характеризуют также *угловой (круговой) частотой  $\omega = 2\pi f$* , выражаемой в рад/с и равной изменению фазы сигнала  $\varphi(t)$  в 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) частота определяется числом переходов через ось времени (т. е. через нуль) за единицу времени.

При непостоянстве частоты используют понятие *мгновенной угловой частоты  $\omega(t) = d\varphi(t)/dt = 2\pi f(t)$* , где  $f(t)$  – *мгновенная циклическая частота*. 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 ее флюктуационными изменениями. Граница между этими нестабильностями условна и задается путем указания времени измерения.

*Периодом  $T$*  любого периодического детерминированного сигнала  $U(t)$  называют наименьший интервал времени, через который регулярно и последовательно повторяется произвольно выбранное мгновенное значение этого сигнала. Отсюда следует, что  $U(t) = U(t + nT)$ , где  $n = 1, 2, 3$  и т. д. Для гармонического сигнала, например для

$U(t) = U_m \sin(2\pi t/T) = U_m \sin[\varphi(t)]$ , период колебания  $T$  можно определить, как интервал времени, в течение которого фаза сигнала  $\varphi(t)$ , выраженная в радианах, изменяется на  $2\pi$ .

Измерение частоты, периода и других временных параметров электрических сигналов – одна из важнейших задач в радиотехнике и телекоммуникационных системах. 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.

Основные измерительные приборы и средства данных измерений:

- осциллографы;
- приемники сигналов эталонных частот и компараторы;
- частотомеры резонансные;
- частотомеры на основе метода заряда-разряда конденсатора;
- частотомеры цифровые;
- измерители интервалов времени цифровые.

Базой для частотно-временных измерений служит группа государственных стандартов частоты – высокоточных мер частоты и времени, объединяющая рубидиевый, цезиевый, водородный и кварцевый стандарты. Практические измерения привязываются к ним 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.

Измерение частоты чаще всего выполняется *цифровым (дискретного счета)* методом, на основе которого создаются цифровые (электронно-счетные) частотомеры. К достоинствам этого метода относятся 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.

Для измерения частоты используются *методы сравнения с частотой источника образцовых колебаний (резонансный, гетеродинный и с помощью осциллографа)*. Однако гетеродинные частотомеры используют редко, а гетеродинное преобразование частоты обычно применяют для переноса частоты СВЧ-колебания в область, удобную для измерения цифровыми приборами.

Методы сравнения используют в основном для градуировки генераторов различных измерительных приборов. 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 интерференционных фигур (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.

В отличие от частотомеров и измерителей временных интервалов с помощью осциллографов можно измерять параметры сигналов сложной временной структуры, например ступенчатых сигналов или сигналов кодовой последовательности. Можно измерять параметры случайных и переходных процессов. Наиболее простым методом считают метод калиброванной развертки (калибровочных меток) (рис. 5.1).

Реальная погрешность этого метода составляет порядка 10 % и зависит от количества меток.

Калибровочные метки известной частоты наносят на изображение сигнала путем модуляции яркости луча, т. е. подачи на сетку ЭЛТ напряжения известной частоты  $f_0$ ,  $T_0 = 1/f_0$ . При этом  $T_{\text{сигн}} = nT_0$ , где  $n$  – количество калибровочных меток.

В некоторых случаях сравнение частот двух гармонических сигналов можно получить методом интерференционных фигур (фигур

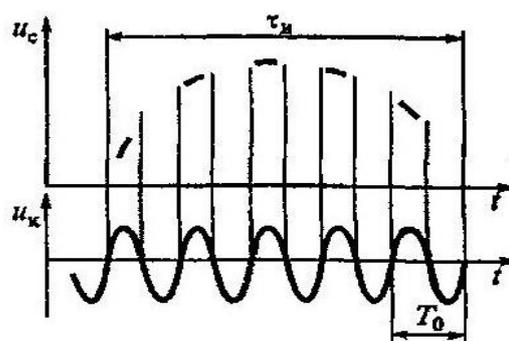


Рис. 5.1. Определение временных интервалов с помощью калибровочных меток:  $u_c$  – напряжение исследуемого сигнала;  $u_k$  – напряжение калибровочного сигнала

Лиссажу). С этой целью колебания известной образцовой частоты  $f_0$  подают на один вход осциллографа (например, X; собственная развертка осциллографа отключается). На второй вход подают колебания неизвестной частоты  $f_{изм}$ . Частоту образцового генератора подстраивают так, чтобы на экране осциллографа получилась простейшая устойчивая фигура, примерные виды изображения приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Интерференционные фигуры при разных фазовых сдвигах между сигналами

Соотношение частот	Фазовый сдвиг, градусы				
	0°	45°	90°	135°	180°
$f_x/f_y = 1/1$					
$f_x/f_y = 1/2$					
$f_x/f_y = 1/3$					
$f_x/f_y = 2/3$					

Точность такого метода определения частоты оказывается высокой и определяется стабильностью образцового генератора, однако получение и наблюдение таких фигур – достаточно сложная измерительная задача.

Соотношение частот двух гармонических колебаний может быть определено как отношение числа точек пересечения по вертикали к числу точек пересечения по горизонтали. Например, как показано на

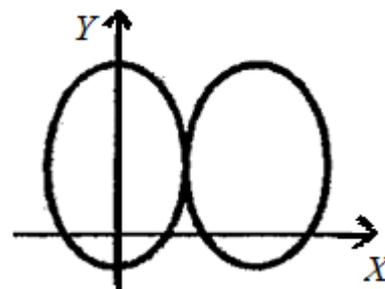


Рис. 5.2. График определения соотношения частот

рис. 5.2, это соотношение составляет  $\frac{f_x}{f_y} = \frac{n_y}{n_x} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$ .

Погрешность измерения интервала времени с помощью осциллографа вызвана нелинейностью его развертки и погрешностями отсчета начала и конца интервала. Третий метод реализуется при условии, что неизвестная частота  $f_x$  больше образцовой  $f_0$ . Круговая развертка создается при проведении ко входам  $Y$  и  $X$  осциллографа гармонических сигналов образцовой частоты, сдвинутых взаимно по фазе на  $90^\circ$ .

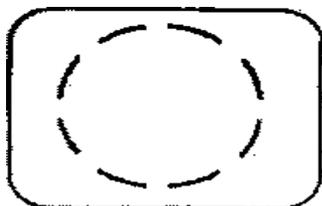


Рис. 5.3. Модулируемая по яркости круговая развертка

Подавая гармонический сигнал с измеряемой частотой  $f_x$  на вход  $Z$  модуляции яркости луча осциллографа и регулируя частоту  $f_0$ , можно получить практически неподвижную по яркости модулированную круговую развертку (рис. 5.3). Если  $N$  – число ярких дуг (или темных промежутков) на круговой развертке, то частота  $f_x = Nf_0$  (на рис. 5.3  $f_x = 8f_0$ ).

Все три перечисленных метода имеют невысокую точность (относительная погрешность измерений порядка  $1 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ ). Верхняя граница диапазона измеряемых частот определяется параметрами осциллографа и для большинства из них не превышает 250 МГц.

### **Резонансный метод измерения частоты**

Сущность резонансного метода состоит в сравнении измеряемой частоты  $f_x$  с собственной резонансной частотой  $f_p$  градуированного колебательного контура или резонатора. Обычно данный метод применяется в диапазоне СВЧ, но может использоваться и в ВЧ-диапазоне. Измерительные приборы, работающие на основе этого метода, называются резонансными частотомерами; их обобщенная структурная схема приведена на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Обобщенная структурная схема резонансного частотомера

Данный момент фиксирует индикатор резонанса, связанный 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.

Ниже приведена упрощенная структурная схема частотомера (волномера) с объемным резонатором (рис. 5.5), включая волновод 1, по которому поступает энергия измеряемой частоты  $f_x$ , петлю связи 2, детектор (полупроводниковый диод) 3 с индикатором резонанса И, объемный резонатор 4 и плунжер 5, предназначенный для измерения одного из размеров резонатора и связанный с отсчетной шкалой. Связь с детектором индуктивная и осуществляется петлей связи 5.

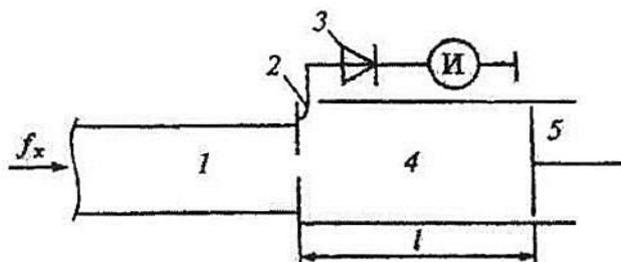


Рис. 5.5. Упрощённая структурная схема резонансного частотомера

Размеры резонатора  $l$  в момент настройки в резонанс однозначно связаны с длиной волны  $\lambda$  возбуждаемых в нем электромагнитных колебаний. Причем резонанс наступает при размерах резонатора  $l = n \lambda/2$ , где  $n = 1, 2, 3$  и т. д. 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  $\lambda$ .

Здесь  $l_1$  и  $l_2$  – показания отсчётной шкалы в момент 1-го и 2-го резонансов. Искомую частоту  $f_x$  вычисляют по формуле  $f_x = c/\lambda$ , где  $c$  – скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме (скорость света;  $c = (2,99776 \pm 0,00004) 10^8$  м/с).

### ***Измерение частоты методом заряда и разряда конденсатора***

Использование метода заряда и разряда конденсатора позволяет создавать простые по 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 можно пояснить с помощью схемы на рис. 5.6, а:

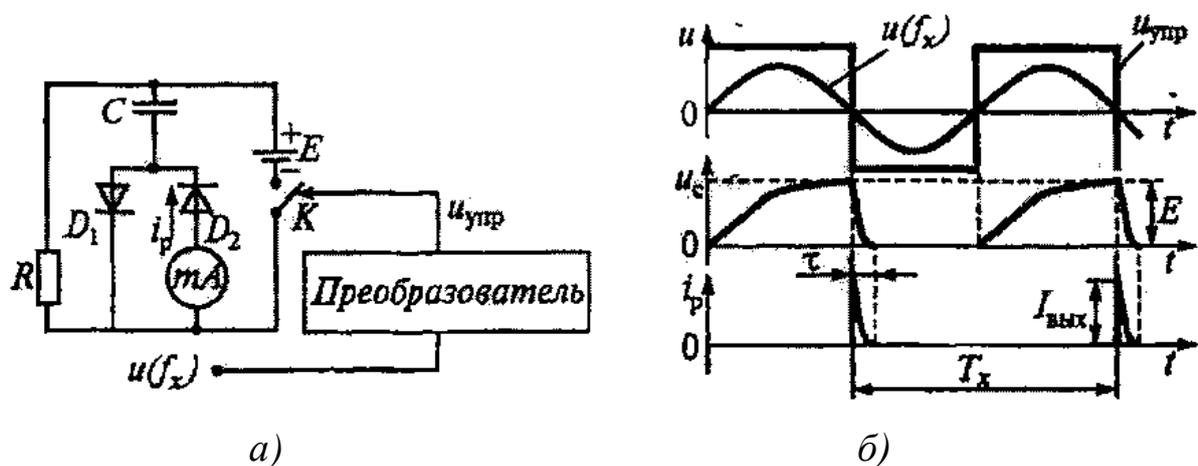


Рис. 5.6. Конденсаторные частотомеры: *а* – структурная схема; *б* – временные диаграммы к схеме

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.

Простейший принцип преобразования входного синусоидального колебания в колебания типа меандр  $u_{упр}$  и сопутствующие сигналы показаны на рис. 5.6, б. Сигнал  $u_{упр}$  управляет ключом  $K$ : при положительной полярности ключ замкнут, при отрицательной разомкнут.

При замкнутом положении ключа происходит разряд емкости  $C$  током  $i_z$ , протекающим через диод  $D_1$ . При замкнутом ключе данная емкость разряжается током  $i_p$ , протекающим через диод  $D_2$ , измерительный прибор  $\mu A$  и сопротивление  $R$ . Непременное условие работы частотомера – требование того, чтобы емкость в течении 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  $i_{max}$ , а время разряда  $\tau$  – постоянным. При этом среднее значение тока, протекающего через измерительный прибор, определится формулой

$$I_{cp} = (1/T_x) \int_0^{\tau} I_{max} dt \quad (5.1)$$

Итак, показания измерительного прибора оказываются пропорциональны частоте  $f_x = 1/T_x$ :

$$I_{cp} = f_x I_{max} \tau \quad (5.2)$$

### Гетеродинный метод измерения частоты

Гетеродинный метод относится к методам сравнения измеряемой частоты  $f_x$  с частотой эталонного генератора  $f_{кв}$  (аналог метода нулевых биений); в качестве последнего используется гетеродин. Упрощенная структурная схема гетеродинного частотомера представлена на рис. 5.7. Она содержит: входное устройство, кварцевый генератор, смеситель, гетеродин, усилитель низкой частоты и индикатор (нулевых биений).

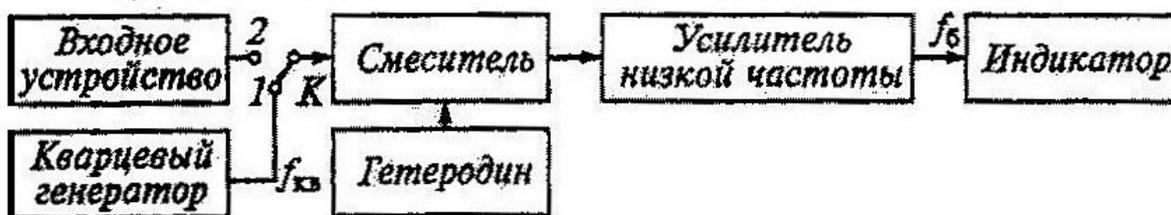


Рис. 5.7. Упрощенная структурная схема гетеродинного частотомера

Действие гетеродинного частотомера сводится к следующему простому принципу: при переключении ключа  $K$  в положение 1 производится корректировка шкалы гетеродина; при положении 2 – измерение частоты, подаваемой на входное устройство.

Корректировка 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:  $f_{кв1}, f_{кв2}, \dots, f_{кв.i}, \dots, f_{кв.n}$ , где  $n$  – номер гармоники. Частоты этих гармоник кварцевого генератора в радиотехнике называют кварцевыми точками.

При измерениях 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). Поскольку измеряемый и гетеродинный сигналы поступают на смеситель, на его входе возникают колебания с суммарными, разностными и комбинационными частотами. Индикаторный прибор фиксирует наличие сигнала биений на минимальной разностной частоте  $f_б = |f_{кв.i} - f_x|$ , проходящего через усилитель низкой частоты (высокочастотные со-

ставляющие, получающиеся в результате смещения частот кварцевого генератора и гетеродина, через усилитель низкой частоты не проходят). Меняя емкость на контуре гетеродина, получают нулевые биения, следовательно, частота гетеродина становится равной частоте кварцевой гармоники  $f_x \approx f_{кв.i}$ .

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 – это достаточно точные измерительные приборы. Их относительная погрешность измерения лежит в пределах  $10^{-3} \dots 10^{-5}$ . Однако в диапазоне средних частот (до 200 МГц и ниже) их вытесняют электронно-счетные частотомеры, которые обеспечивают ту же высокую точность, но значительно проще в эксплуатации.

### ***Цифровой метод измерения частоты***

Цифровой (дискретного счета) метод измерения частоты реализован в цифровых (*электронно-счетных*) частотомерах (ЭСЧ). 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  $10^{-6} \dots 10^{-9}$ ). Как уже отмечалось, цифровые частотомеры – многофункциональные приборы. 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 поясняется на рис. 5.8, где приведены структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения частоты и временные диаграммы к его работе.

Исследуемый гармонический сигнал, имеющий частоту  $f_x$ , подается на входное устройство (ВУ), усиливающее или ослабляющее его до значения, требуемого для работы последующего устройства частотомера (рис. 5.8, *а*).

Снимаемый с выхода ВУ гармонический сигнал  $u_1$  (рис. 5.8, *б*) поступает на первый формирователь импульсов (Ф1), 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 его возрастания. Формирователь Ф1 состоит из усилителя-ограничителя и компаратора (триггера Шмитта).

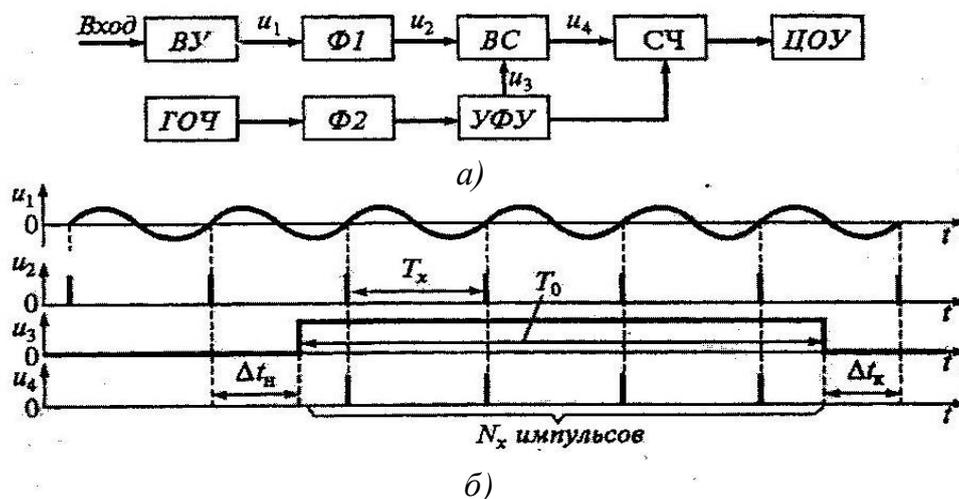


Рис. 5.8. Цифровой частотомер в режиме измерения частоты:  
а – структурная схема; б – временные диаграммы

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  $T_0$  называется *временем счета*.

Временной селектор открывается строб-импульсом  $u_3$  и в течение его длительности пропускает группу (пакет) импульсов  $u_2$  на вход счетчика (СВ). В результате на счетчик поступает пакет из  $N_x$  импульсов  $u_4$ .

Из графика на рис. 5.8, б следует, что

$$T_0 = N_x T_x - \Delta t_u + \Delta t_k = N_x T_x - \Delta t_\delta, \quad (5.3)$$

где  $\Delta t_u$  и  $\Delta t_k$  – *погрешности дискретизации* начала и конца интервала  $T_0$ , вызванные случайным положением строб-импульса относительно счетных импульсов  $u_2$ ;  $\Delta t_\delta = \Delta t_u - \Delta t_k$  – *общая погрешность дискретизации*.

Пренебрегая в (5.3) погрешностью  $\Delta t_\delta$ , 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:

$$f_x = N_x / T_0. \quad (5.4)$$

Для формирования строб-импульса на устройство УФУ поступают короткие импульсы с периодом  $T_0$  (на рисунке для упрощения они не показаны) от схемы, включающей генератор образцовой частоты (ГОЧ) и второй формирователь импульсов (Ф2), аналогичный формирователю импульсов Ф1. В составе ГОЧ имеются кварцевый генератор образцовой частоты  $f_{кв}$  и деликатный делитель частоты с коэффициентом деления  $K_d$  (каждая декада уменьшает частоту  $f_{кв}$  в десять раз). Период импульсов на входе формирователя Ф2 и длительность строб-импульса равны периоду сигнала на входе делителя частоты, т. е.  $T_0 = K_d / f_{кв}$ , поэтому выражение (5.4) можно представить в виде

$$f_x = N_x f_{кв} / K_d \quad (5.5)$$

Отношение  $f_{кв} / K_d$  можно дискретно изменять вариацией  $K_d$ , т. е. за счет изменения цикла декад делителя  $\Delta$ .

Счетчик подсчитывает  $N_x$  импульсов и выдает соответствующий код в цифровое отсчетное устройство (ЦОУ). Отношение  $f_{кв} / K_d$  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, за счет изменения  $K_d$  выбрано  $n = 6$ , то число  $N_x$ , отображаемое на ЦОУ, соответствует частоте  $f_x$ , выраженной в МГц. Перед началом измерений УФУ сбрасывает показания счетчика до нуля.

Погрешность измерения частоты  $f_x$  имеет *систематическую* и *случайную* составляющие.

Систематическая составляющая вызывается в основном долговременной нестабильностью частоты кварцевого генератора  $f_{кв}$ . Ее уменьшают путем термостатирования кварца или за счет применения в кварцевом генераторе элементов с термокомпенсацией. При этом относительное измерение частоты  $f_{кв}$  за сутки обычно не выше  $f_{кв} = 5 \cdot 10^{-9}$ . Погрешность за счет неточности установки номинального значения частоты  $f_{кв}$  уменьшают 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  $(1...5) \cdot 10^{-10}$ .

Случайную составляющую определяют *погрешностью дискретизации*  $\Delta t_d = \Delta t_u - \Delta t_k$ . Поскольку взаимная синхронизация строб-

импульса и счетных импульсов отсутствует, погрешности  $\Delta t_u$  и  $\Delta t_k$ , определяющие на рис. 5.8, б положение начала и конца строб-импульса между двумя соседними счетными импульсами, могут принимать во времени с одинаковой вероятностью значения от нуля до  $T_0$ . Поэтому погрешности  $\Delta t_u$  и  $\Delta t_k$  случайны и распределены по равномерному закону. Вследствие независимости этих погрешностей общая погрешность дискретизации  $\Delta t_\partial$  распределена по треугольному закону с предельными значениями  $\pm T_0$ .

Обычно диапазон измеряемых частот цифровых частотомеров ограничивается снизу погрешностью дискретизации, а сверху – конечным быстродействием используемых счетчиков-делителей. Верхний предел измерения частоты обычно не превосходит 200 МГц, и его расширяют способом гетеродинного преобразования (переноса) измеряемой частоты в область более низких частот.

Необходимо отметить, что в структурную и принципиальную схемы частотомера обязательно включают схему автоматической регулировки усиления (АРУ) и подавления внешних помех. При малом уровне входного сигнала (ниже милливольт) измерения прекращаются, и показания счетчика сбрасываются до нуля. В устройстве предусмотрены также меры защиты от перегрузок.

В современных схемах цифровых частотомеров широко применяют синтезаторы частот, создающие сигналы с дискретной сеткой частот. Цифровые частотомеры с программно управляемыми синтезаторами частот и встроенными микропроцессорами – перспективные измерительные приборы благодаря высокой точности, широкому диапазону измеряемых частот и удобству включения в автоматизированные измерительные системы.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с оборудованием, необходимым для лабораторной работы.
2. Изучить известные методы измерения частоты переменного тока.
3. Выполнить измерение частоты методом интерференционных фигур. Для этого:
  - подключить к осциллокопу CQ501OB генераторы ГЗ-33 № 8598 и ГЗ-33 № 6852;

- установить на генераторе ГЗ-33 № 8598 частоту, обозначив ее  $f_x$ , по указанию преподавателя считая ее неизвестной;
- устанавливая частоту  $f_0$  генератора ГЗ-33 № 6852 до устойчивого изображения, получить на экране осциллоскопа CQ5010B интерференционные фигуры;
- результаты измерений внести в таблицу:

Соотношение частот $f_x/f_0$	Фазовый сдвиг, градусы					Показания генератора ГЗ-33 № 6852 $f_0$ , Гц	Частота $f_0 \times$ × соотношение частот
	0°	45°	90°	135°	180°		
1:1							
1:2							
1:3							
2:3							

1. Результат измерений записать в виде

$$f_x = \bar{f}_i \pm \Delta f,$$

где  $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$  – среднее арифметическое значение всех результатов измерений;  $\Delta f = \frac{t_p S_f}{\sqrt{n}}$  – абсолютная погрешность измерения.

Здесь  $f_i$  – частота образцового генератора, умноженная на соотношение частот (результат измерений);  $n$  – количество измерений, ед.  $S_f$  – среднеквадратическое отклонение результата измерения;  $t_p$  – коэффициент Стьюдента.

При  $n=4$  и доверительной вероятности  $P=0,95$

$$t_p = 3,18; S_f = \sqrt{\frac{n}{n-1} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 \right]} = \sqrt{\frac{n}{n-1} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i^2 - \bar{f}^2 \right]}$$

### Форма отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений.
2. Результаты измерений и наблюдений по пп. 3, 4 порядка выполнения работы.
3. Ответы на контрольные вопросы (по указанию преподавателя).

## Литература

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

### Контрольные вопросы и задания

1. Поясните понятия частоты и угловой частоты, пользуясь изображением на фазовой плоскости.
2. Какой сигнал можно назвать детерминированным?
3. Какое влияние на результат измерения частоты методом интерференционных фигур оказывает различие в амплитудах образцового и исследуемого сигналов?
4. Назовите причины, вследствие которых интерференционная картина на экране осциллографа трудно поддается стабилизации.
5. Какое влияние на точность измерения частоты резонансным методом оказывает добротность колебательного контура резонатора?
6. Является ли скорость распространения электромагнитных волн величиной постоянной?
7. Чему равна скважность последовательности прямоугольных импульсов типа меандр?
8. По какому закону следует изменять зарядный ток в RC-цепи, чтобы напряжение на емкости возрастало линейно?
9. Поясните значение термина «гетеродин».
10. Какие кратные и дольные приставки используют при обозначении частоты?
11. Что такое размерность физической величины? Запишите размерности частоты и угловой частоты.
12. Что называют погрешностью дискретизации?

## Лабораторная работа № 6

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТОРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Цель работы:** ознакомиться с существующими методами измерения сопротивлений линейных резисторов и характеристик нелинейных элементов; освоить практические навыки по выполнению эксперимента и обработке результатов измерений.

### **Оборудование:**

1. Мост постоянного тока Р333.
2. Источник электропитания ВСП-30.
3. Мультиметры М830В.

### **Теоретическая часть**

Электрические цепи представляют совокупность соединенных определенным образом источников электрической энергии и нагрузок, по которым протекает постоянный или переменный ток. С точки зрения соотношения размеров цепей и рабочей длины волны электрических колебаний, имеющих в них место, различают цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Радиоэлектронные цепи, размеры которых гораздо меньше рабочей длины волны, называют *цепями с сосредоточенными параметрами*. Свойства данных цепей практически не зависят от конфигурации выводов (электродов) активных и пассивных элементов и размеров соединительных проводов. Радиоэлектронные цепи, физические размеры которых соизмеримы с рабочей длиной волны колебаний, относятся к *цепям с распределенными параметрами*. Каждый элемент или соединительный провод такой цепи обладает сопротивлением (активными, т. е. невозвратимыми, потерями мощности), индуктивностью и емкостью. Такие цепи часто называют длинными линиями, или СВЧ-трактами.

В электрических цепях с сосредоточенными параметрами широко применяют 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 измерении, однако, не всегда удается определить значение того или иного параметра, соответствующее идеальному, совершенному виду элемента. Требуется знать ряд вторичных параметров элементов, например: добротность  $Q$ , тангенс угла потерь  $\delta$ , характеристическое сопротивление  $\rho$ .

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 Е6 – Е7. Большая группа приборов (некоторые мосты и измерительные линии) обозначаются буквой «Р».

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 распространенные методы измерения здесь – метод амперметра – вольтметра, метод непосредственной оценки, мостовой метод, резонансный метод и метод дискретного счета (цифровой).

Основные параметры длинных линий по аналогии с цепями с сосредоточенными постоянными – это *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 все основные элементы СВЧ-трактов – это аналоги двух- и четырехполюсников, из которых состоят цепи с сосредоточенными постоянными. Эта аналогия позволяет рассматривать параметры СВЧ-трактов как параметры двух- и четырехполюсников. Приборы, предназначенные для измерения параметров цепей с распределенными постоянными, классифицируются в зависимости от характера конкретных измерений и вида измеряемых величин.

### ***Измерение активных сопротивлений***

Величины измеряемых активных сопротивлений лежат в пределах от  $10^8$  до  $10^{10}$  Ом; выпускаемые серийные приборы чаще охваты-

вают 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 одного амперметра или вольтметра (могут быть электромеханические или электронные приборы);
- логотрические методы;
- мостовые методы (аналоговые и цифровые приборы).

Метод амперметра – вольтметра основан на использовании закона Ома. На рис. 6.1 представлена реализация этого метода.

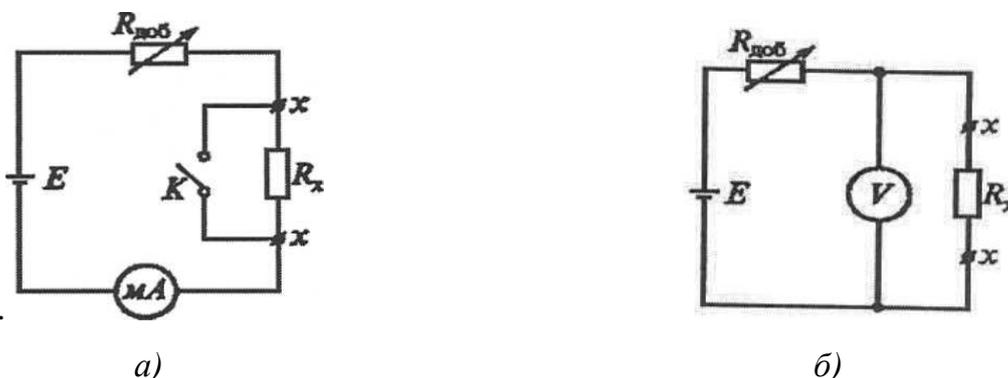


Рис. 6.1. Измерение активных сопротивлений методом амперметра – вольтметра

В схеме на рис. 6.1, а отклонение стрелки магнитоэлектрического миллиамперметра пропорционально току (напряжению источника  $E$ ); в схеме на рис. 6.1, б отклонение стрелки магнитоэлектрического вольтметра пропорционально току (напряжению источника  $E$ )

$$I = \frac{E}{R_{доб} + R_x} \quad (6.1)$$

и обратно пропорционально измеряемому сопротивлению  $R_x$ . По этой схеме измеряют достаточно большие сопротивления (от 1 Ом до 200 МОм). Перед измерениями зажимы  $x$  замыкают ключом  $K$  и резистором  $R_{доб}$  устанавливают такой ток, чтобы стрелка отклонилась на всю шкалу, что соответствует точке 0 Ом. Подобную схему измерения активного сопротивления широко используют в комбинированных приборах – так называемых тестерах.

Для измерения небольших сопротивлений (0,01...100 Ом) применяют схему, изображенную на рис. 6.1, б. Показания вольтметра определяются формулой

$$U = \frac{ER_x}{R_{\text{доб}} + R_x} \quad (6.2)$$

при условии, что  $R_{\text{доб}} \gg R_x$ ,  $U \approx (E/R_{\text{доб}})R_x$ , т. е. имеет место прямая зависимость напряжения (показания вольтметра) от измеряемого сопротивления  $R_x$ . Перед измерением стрелку на приборе совмещают с отметкой  $\infty$  при разомкнутых зажимах  $x$ .

Точность обоих методов невысока, погрешность измерения порядка 1,5...2 %. Наблюдается прямая зависимость показаний от напряжения питания  $E$  и его стабильности. Уменьшить влияние источника питания  $E$  на точность измерения активных сопротивлений позволяет применение магнитоэлектрического логометра. Устройство и схема включения магнитоэлектрического логометра представлены на рис. 6.2.

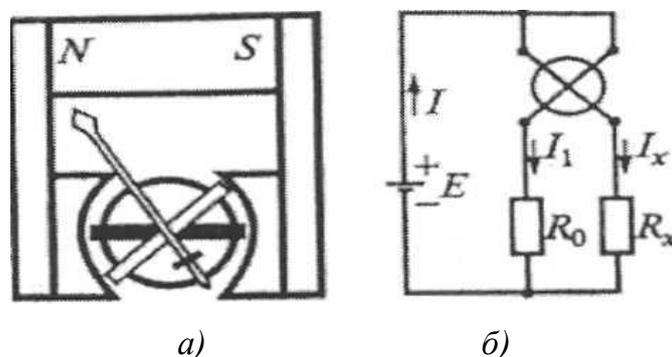


Рис. 6.2. Магнитоэлектрический логометр:  
а – устройство; б – схема включения

*Магнитоэлектрический логометр* представляет систему из двух жестко скрепленных между собой рамок, помещенных в неравномерное поле постоянного магнита (см. рис. 6.2, а). Неравномерность магнитного поля достигается за счет специальной конфигурации полюсных наконечников. Неравномерным поле делают 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.

$$M_1 = \psi_1(\alpha)I_1; \quad M_2 = \psi_2(\alpha)I_x, \quad (6.3)$$

где  $I_1$ ,  $I_x$  – токи, протекающие в рамках, А;  $\psi_1(\alpha)$ ,  $\psi_2(\alpha)$  – величины потокосцеплений с соответствующими им рамками. Поскольку 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

$$\alpha = F(I_1/I_2). \quad (6.4)$$

Для схемы на рис. 6.2, б

$$I = \frac{E}{R_p + R_0}; \quad I_x = \frac{E}{R_p + R_x}, \quad (6.5)$$

где  $R_p$  – сопротивления рамок, Ом;  $R_0$  – образцовое сопротивление, Ом.

Таким образом, показания логометра практически не зависят от колебания напряжения питания, так как

$$\alpha = F \frac{R_p + R_x}{R_p + R_0}. \quad (6.6)$$

Подобная линейная зависимость 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 вращается вручную.

Еще одна реализация метода амперметра – вольтметра представлена на рис. 6.3.

Пользуясь законом Ома, нетрудно получить искомое значение неизвестного сопротивления.

Для схемы рис. 6.3, а:

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A \quad (6.7)$$

Для схемы рис. 6.3, б.

$$R_x = \frac{UR_V}{IR_V - U}, \quad (6.8)$$

где  $U$ ,  $I$  – показания вольтметра и амперметра;  $R_V$ ,  $R_A$  – внутренние сопротивления вольтметра и амперметра соответственно.

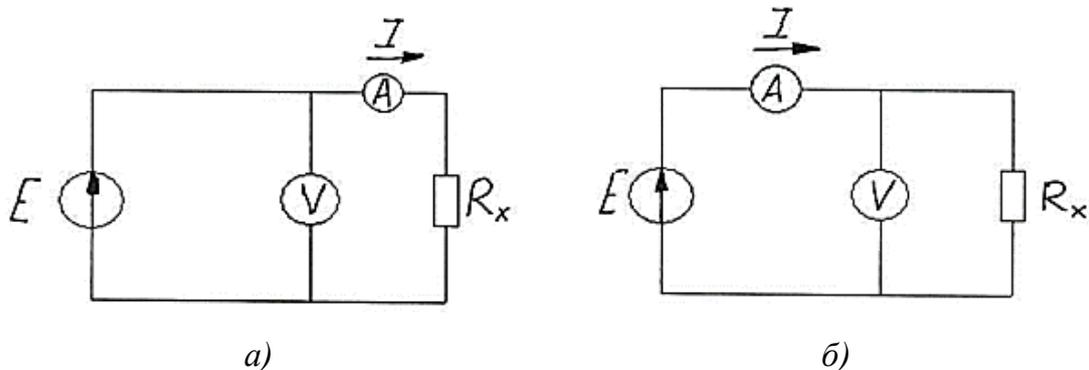


Рис. 6.3. Схемы измерения сопротивлений методом амперметра – вольтметра

При определении неизвестного сопротивления  $R_x$  методом амперметра – вольтметра имеет место методическая составляющая общей погрешности

$$\Delta R = R_x - R_x'', \quad (6.9)$$

где  $R_x''$  – истинное значение сопротивления резистора, за  $R_x''$  можно принять результат измерения высокоточным средством измерения. На практике принимают метрологический запас (запас по точности) не менее трех крат. В этой работе для определения  $R_x''$  следует использовать мост Р333.

Относительная методическая погрешность составит

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R_x''}. \quad (6.10)$$

### Мостовые схемы измерителей

Основные методы измерения параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  на переменном токе – мостовые и резонансные. Мостовые методы измерения более точны, но могут использоваться только в ограниченной полосе частот. Существует несколько разновидностей мостовых схем: четырехплечие, шестиплечие (двойные), уравновешенные, неуравновешенные и процентные. Управление этими мостами может быть как ручным, так и автоматическим. Наибольшее распространение получили схемы четырехплечих уравновешенных мостов. Обобщенная структурная схема такого моста показана на рис. 6.4, а.

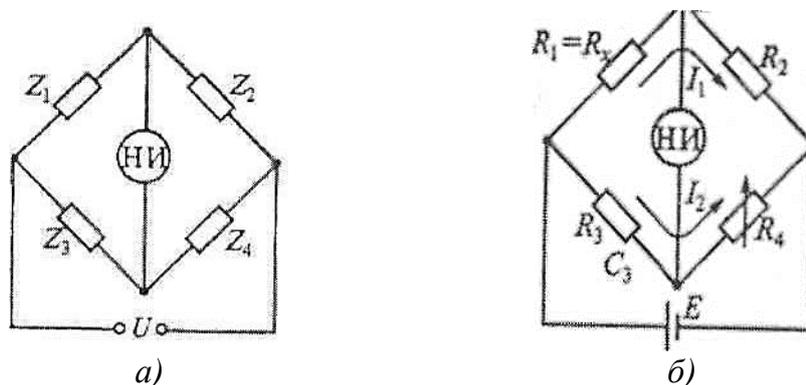


Рис. 6.4. Структурная схема четырехплечевого моста:  
а – обобщенная; б – упрощенная

Сопротивления четырехплечевого моста в общем случае носят комплексный характер:

$$\dot{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi}; \dot{Z}_2 = Z_2 e^{j\varphi}; \dot{Z}_3 = Z_3 e^{j\varphi}; \dot{Z}_4 = Z_4 e^{j\varphi}. \quad (6.11)$$

Условия равновесия такого моста будут определяться двумя уравнениями:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3; \quad (6.12)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (6.13)$$

Для выполнения этих условий необходимо наличие в плечах моста двух элементов с регулируемыми параметрами. Этими параметрами наиболее удобно сделать активные сопротивления. В качестве элемента, обеспечивающего необходимый фазовый сдвиг, используют эталонный конденсатор емкостью  $C_0$  с малыми потерями.

Упрощенная структурная схема четырехплечего уравновешенного моста для измерений активных сопротивлений представлена на рис. 6.4, б. Магнитоэлектрический, электронный или цифровой нуль-индикатор (НИ) включается в диагональ моста, ток в которой в момент измерения необходимо установить равным нулю. Согласно условию (6.12) равновесия моста необходимо, чтобы выполнялось равенство, откуда неизвестное сопротивление можно выразить следующей формулой:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (6.14)$$

Для достижения равновесия моста достаточно иметь один регулируемый параметр (резистор  $R_4$ ), как показано на рис. 6.4, 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 от 100 Ом до 100 кОм. При малых измеряемых сопротивлениях вклад в погрешность измерения вносят сопротивления соединительных проводов, при больших – сопротивления утечки.

Представленная на рис. 6.4, б схема может быть создана в цифровом варианте. 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 уравновесится. Положение ключей характеризует собой код измеряемой величины, поступающий затем в цифровое отсчетное устройство.

### Методы выявления характеристик нелинейных элементов

Методы выявления характеристик нелинейных элементов аналогичны рассмотренным выше, т. е. нелинейный элемент включается по схемам рис. 6.3 вместо резистора  $R_x$ . При этом следует иметь в виду шунтирующее действие амперметра и вольтметра: на малых токах (больше  $R_x$ ) следует применять схему рис. 6.3, а; на больших токах (малое значение) – схему рис. 6.3, б.

Типичный представитель нелинейного элемента – полупроводниковый диод. Обобщенная вольт-амперная характеристика диода представлена на рис. 6.5. Это график зависимости между током и напряжением полупроводникового прибора.

График прямого тока (первый квадрант) характеризуется двумя участками.

Начальный участок (до 0,2...0,4 В для германиевых диодов; до 0,6...0,8 В для кремниевых диодов) отражает наличие на  $p - n$  переходе разности потенциалов, образованной диффузионно перемещенными неоснованными носителями заряда (электронами и дырками). На этом участке прямой ток очень мал, участок получил название «диодная пятка».

Когда прямое напряжение сравняется с напряжением диодной пятки, потенциальный барьер  $p - n$  перехода будет уничтожен и в цепи останется только собственное сопротивление областей  $p$  и  $n$ . Далее прямая ветвь становится практически линией.

Обратный ток  $I_{обр}$  при возрастании обратного напряжения (третий квадрант) сначала быстро увеличивается. Это вызвано тем, что уже при небольшом  $U_{обр}$  за счет повышения потенциального барьера в переходе снижается диффузионный ток, направленный навстречу току проводимости. Следовательно, полный ток  $I_{обр} = I_{др} - I_{диф}$  резко

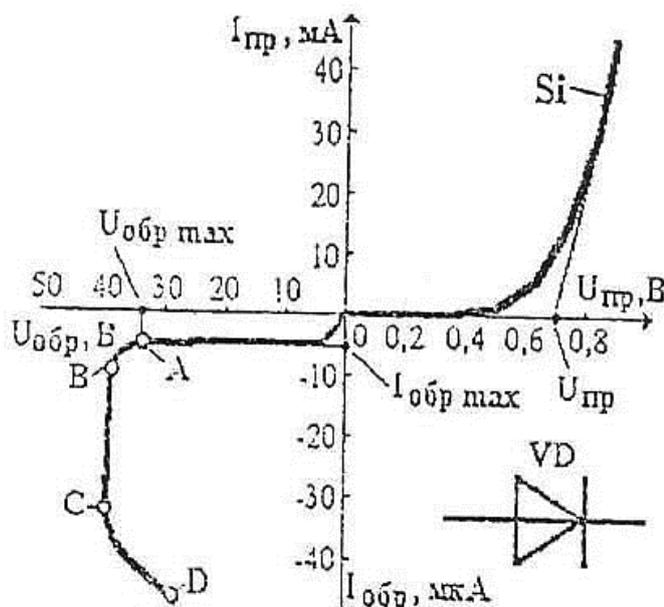


Рис. 6.5. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

увеличивается. При дальнейшем росте  $U_{обр}$  ток повышается незначительно. Рост тока происходит из-за нагрева перехода током за счет утечки по поверхности, а также лавинного размножения носителей заряда, т. е. увеличения числа носителей заряда в результате ударной ионизации.

При некотором значении  $U_{обр}$  возникает пробой  $p - n$  перехода, при котором  $I_{обр}$  резко возрастает. Различают два вида пробоев: электрический и тепловой пробой  $p - n$  перехода. Электрический пробой, область которого обозначена ABC (см. рис. 6.5), считают обратимым.

На участке CD тепловыделение возрастает, растет температура  $p - n$  перехода и диод разрушается. Это необратимый тепловой пробой.

### ***Цифровые методы измерения параметров элементов***

В радиоэлектронике и устройствах телекоммуникационных систем используют два основных метода преобразования линейных параметров цепей: прямой и уравнивающий.

Цифровой измерительный прибор прямого преобразования представляет сочетание аналогового преобразователя какого-либо параметра элемента в активную величину и соответствующего цифрового прибора для ее измерения. Их классифицируют в зависимости от вида промежуточного преобразования.

Цифровые измерительные приборы уравнивающего преобразования представляют собой цифровые мосты постоянного (для измерения  $R$ ) или переменного (для измерения  $R$ ,  $L$  и  $C$ ) тока. Один из самых простых методов измерения  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – преобразование их в напряжение. Исследуемый двухполюсник включают в измерительную цепь, питание которой осуществляется от источника образцового тока или напряжения. Второй способ цифрового измерения  $R$ ,  $L$ ,  $C$  параметров основан на предварительном преобразовании их значений в частоту гармонического сигнала. В этом случае исследуемый элемент включают в частотно-зависимую цепь, определяющую частоту колебаний генератора (источника).

В практике измерений  $R$ ,  $L$ ,  $C$  широкое распространение получили методы развертывающего преобразования. Они основаны на формировании определенной развертывающей функции, аналитическое выражение которой включает в себя измеряемый параметр, и на фиксации моментов времени, когда она достигает заранее заданных

значений. 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 (частота  $f$ , период  $T$  или временной интервал  $\Delta t$ ). Рассматриваемый метод применяют обычно в сочетании с предварительным преобразованием параметров  $R$ ,  $L$  или  $C$  в напряжение. В этом случае развертывающая функция также представляет собой напряжение.

Структурная схема простейшего преобразователя параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  в период меандрового сигнала показана на рис. 6.6, а.

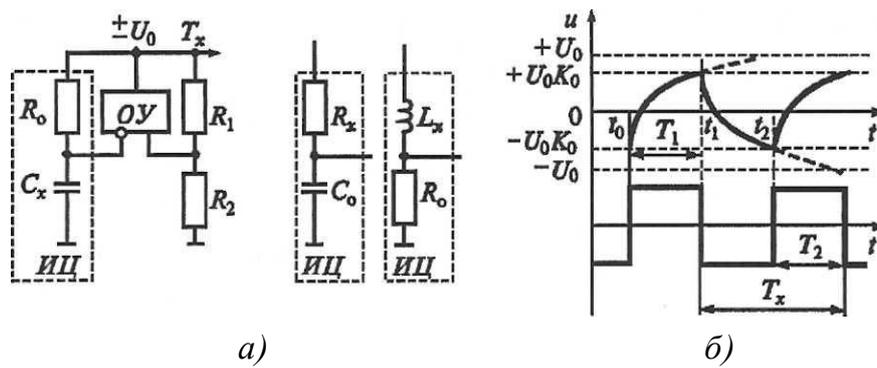


Рис. 6.6. Измерительный преобразователь параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  в период меандрового сигнала: а – структурная схема; б – временные диаграммы

Измерительная цепь (ИЦ) интегрирующего типа с постоянной времени  $\tau_x = R_0 C_x$  (или  $R_x C_0$ , или  $L_x / R_0$ ) питается напряжением с выхода операционного усилителя (ОУ), являющегося компаратором (устройством сравнения). Порог его срабатывания задают резистивные делители  $R_1$  и  $R_2$  (коэффициенты передачи цепи положительной обратной связи). Временные диаграммы работы преобразователя параметров приведены на рис. 6.6, б.

При подаче с выхода ОУ на ИЦ в момент времени  $t_0$  напряжения  $U_0$  происходит его интегрирование измерительной цепью. Развертывающая функция на инвертирующем входе ОУ имеет следующий вид:

$$F(\tau_x; U_0; t) = U_0(1 + \beta)(1 - e^{-t/\tau_x}) - \beta U_0, \quad (6.15)$$

где  $\beta = R_2 / (R_1 + R_2)$  – коэффициент передачи цепи положительной обратной связи.

При достижении этой функцией порогового значения  $+\beta U_0$  в момент времени  $t_1$  срабатывает компаратор на ОУ, изменяя на выходе

знак напряжения  $U_0$  на противоположный. Интервал времени интегрирования

$$T_1 = t_1 - t_0 = \tau_x \ln \frac{(1+\beta)}{(1-\beta)}. \quad (6.16)$$

На следующем интервале времени  $T_2 = t_1 - t_2$  происходит формирование развертывающей функции с противоположным знаком производной. Очевидно,

$$T_x = T_1 + T_2 = 2\tau_x \ln \frac{(1+\beta)}{(1-\beta)}, \quad (6.17)$$

при равенстве положительного и отрицательного порогов срабатывания  $|+\beta U_0| = |-\beta U_0|$  интервалы  $T_1$  и  $T_2$  равны. При этом период меандрового напряжения на выходе ОУ определяется выражением (6.17).

Результат измерения периода  $T_x$  пропорционален значению определяемого параметра  $R_x$  (или  $C_x$ , или  $L_x$ ).

Наряду с методами развертывающего преобразования в практике используют также методы уравнивающего преобразования  $R_x$ ,  $C_x$  и  $L_x$ -параметров. Измеряемую величину с образцовой чаще всего сравнивают путем уравнивания мостовой измерительной цепи, в одно из плеч которой включают исследуемый двухполюсник. В смежное плечо моста включают 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. Уравнивание

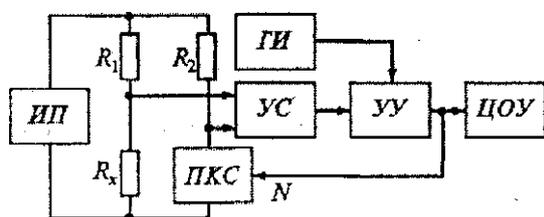


Рис. 6.7. Структурная схема цифрового моста постоянного тока уравнивающего типа

моста может быть как следящим, так и развертывающим.

На рис. 6.7 показана структурная схема цифрового моста постоянного тока уравнивающего типа для измерения активного сопротивления резистора или другого элемента с омическими потерями.

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. Уравновешивание производят до тех пор, пока напряжение в выходной диагонали моста не станет меньше порога чувствительности УС. При этом измеряемое сопротивление

$$R_x = R_1 R_{\text{ПКС}} / R_2 k_{\text{ПКС}} N / R_2, \quad (6.18)$$

где  $k_{\text{ПКС}} = R_{\text{ПКС}} / N$  – коэффициент преобразования ПКС;  $R_{\text{ПКС}}$  – сопротивление ПКС.

Как следует из формулы (6.18), результат измерения (он фиксируется ЦОУ) не зависит от напряжения питания моста.

Изменение пределов измерения происходит путем изменения отношения сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  цепи положительной обратной связи. Точность измерения определяется стабильностью сопротивления образцовых резисторов  $R_1$  и  $R_2$  и точностью ПКС.

Более сложны мосты переменного тока, предназначенные для измерений комплексного сопротивления, индуктивности и емкости при определенной фиксированной частоте (обычно 1 кГц). Эти мосты выполняют уравновешивание по двум параметрам, т. е. производят раздельное и независимое уравновешивание двух составляющих комплексного сопротивления  $Z_x$ .

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. 6.8.

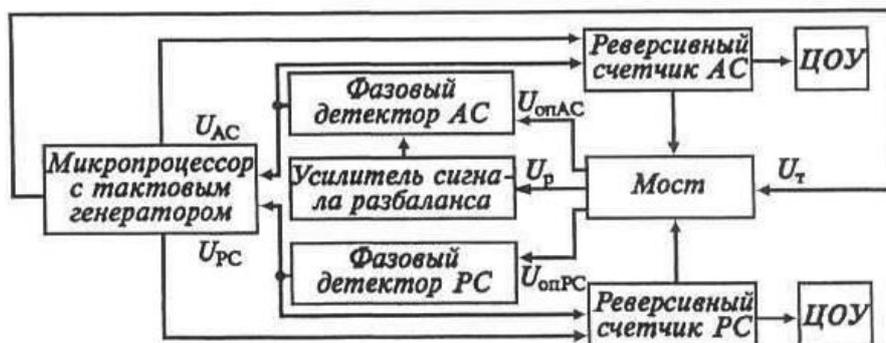


Рис. 6.8. Упрощенная структурная схема цифрового автоматического измерителя комплексного сопротивления с микропроцессором

В основе данного измерения параметров цепей цифровым прибором лежит мостовой метод с фазочувствительными детекторами уравнивания. Мостовая схема питается от генератора переменного напряжения (на рис. 6.8 для упрощения не показан).

*Микропроцессор* со 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  $U_{оп.АС}$  и  $U_{оп.РС}$  снимаются с мостовой схемы. Напряжения разбаланса с фазовых детекторов подают на *реверсивные счетчики*, управляющие состоянием органов уравнивания мостовой схемы, и микропроцессор, задающий сигналами  $U_{АС}$  и  $U_{РС}$  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 выбирают 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. Мостом управляют с помощью сигнала  $U_T$  микропроцессора.

По мере приближения к состоянию баланса моста напряжение разбаланса уменьшается, вследствие чего снижается скорость его уравнивания. При достижении состояния равновесия мостовой схемы дискретное уравнивание прекращается и результаты измерения поступают на цифровые отсчетные устройства.

Микропроцессор осуществляет самокалибровку прибора перед началом измерений, а также учитывает влияние внешних условий на точность измерений.

### ***Устройство лабораторной установки***

Лабораторная установка представляет собой комплект средств измерений, источник питания и образцы комплектов дискретной электронной техники – резисторы и полупроводниковые диоды.

В отдельном корпусе смонтированы два мультиметра модели М-830В с гнездами для подключения источника питания ВСП-30 и щупов мультиметров, а также клемники для зажима исследуемых элементов. В комплект входит измерительный мост постоянного тока Р333.

Мультиметр представляет собой комбинированный измерительный прибор, предназначенный для измерения напряжений в цепях переменного тока (*ACV*), напряжений в цепях постоянного тока (*DCV*), постоянных токов (*DCA*), сопротивлений ( $\Omega$ ) диодов и параметров транзисторов (*hFE*). Диапазон измерений указан на корпусе прибора.

Мост постоянного тока Р333 предназначен для измерения постоянных сопротивлений. Устройство прибора изображено на его крышке. При измерениях подключают измеряемый резистор к клеммам  $R_x$  (кл. 2 и 3), а к клеммам «+» и «-» внешней батареи Б подключают источник питания ВСП-30. Для резисторов номиналом в сотни кОм, установить на ВСП-30 напряжение 10...16 В. Переключатель «СХЕМА» поставить в положение «МВ». Нажать кнопку включения гальванометра «ВКЛ. Г» и переключателем множителя (*n*) добиться примерно нулевого положения стрелки гальванометра М314. Затем одновременно нажать кнопки «ГРУБО» и «ВКЛ. Г» и декадными переключателями привести гальванометр в нуль. Окончательно сбалансировать мост, нажав «ТОЧНО» и «ВКЛ. Г».

Источник питания (стабилизированного постоянного напряжения) типа ВСП-30 обеспечивает электропитание в различных диапазонах:

- по напряжению 30 В;
- по току 3 А.

Выходное напряжение устанавливают ступенями ручкой «ГРУБО» и в пределах диапазона – ручкой «ПЛАВНО». Для подключения к сети 200 В предназначен тумблер «ВКЛ».

Рассмотренная лабораторная установка позволяет различными методами определить сопротивление резисторов и выявить характеристики нелинейных элементов – полупроводниковых диодов.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
2. Получить у преподавателя элементы для исследования – два резистора и один полупроводниковый диод (стабилитрон). Выписать из справочника параметры стабилитрона и записать номинальное значение сопротивления резистора и допуск по обозначениям на корпусе.
3. Выполнить измерения сопротивления резистора методом амперметра-вольтметра (см. рис. 6.3). Напряжение питания схемы (выходное напряжение ВСП-30) установить равным 18 В.
4. Измерить сопротивление резистора мостом постоянного тока.
5. Вычислить погрешности измерения по п. 3, принимая за истинное значение сопротивления величину, полученную в п. 4. Сравнить полученную погрешность с допуском на сопротивление, указанным на корпусе резистора. При расчетах принять  
 $R_V = 0,5 \text{ МОм}; R_1 = 12,5 \text{ Ом}.$
6. Выявить вольт-амперную характеристику стабилитрона (см. рис. 6.5). При производстве измерений для прямой и обратной ветвей следить за полярностью и выходным напряжением источника питания.
  - 6.1 Прямая ветвь. Участки диодной пятки и открытого диода проводить на разных диапазонах измерения мультиметра М-830 В.
    - 6.1.1 Участок диодной пятки:
      - установить напряжение источника: около 0,5 В;
      - диапазон измерения М-830 В по напряжению: 2000 мВ;
      - диапазон измерения М-830 В по току: 200  $\mu\text{А}$ ;
      - переменный резистор установки установить на максимальное значение (крайнее правое положение).

Результаты эксперимента записать в табл. 6.1.

Предварительно установить резистор установки в среднее положение. Значение тока устанавливать микроизмерением выходного

напряжения источника питания ВСП-30, начиная с нулевого значения. Обратите внимание на порядок величины по рис. 6.5.

Таблица 6.1

Диодная пятка

№ п/п	$I$ , $\mu\text{A}$	$U$ , мВ
1	0,2	
2	5,0	
3	70	
4	100	
5	148	

В табл. 6.1 приведены ориентировочные значения тока применительно к диоду Д814Д.

6.1.2. Участок открытого диода:

– установить диапазон измерения М-830 В по току: 2000  $\mu\text{A}$ . По аналогии с п. 6.1.1 провести эксперимент. Результаты занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Открытый диод

№ п/п	$I$ , $\mu\text{A}$	$U$ , мВ
1	1060	
2	1350	
3	1650	
4	1950	

В табл. 6.2 приведены ориентировочные значения тока применительно к диоду Д814Д.

6.2. Обратная ветвь.

– установить выходное напряжение ВСП-30 в соответствии с паспортными данными напряжения стабилизации (участок ВС на рис. 6.5) диода по минимальному значению. Например, для диода Д814Д –  $U_{\text{дс}}$  13 В;

- установить диапазон измерения М-830 В по току 20  $\mu\text{A}$ ;
- установить диапазон измерения М-830 В по напряжению 20 В.

Провести эксперимент, внося результаты измерений в табл. 6.3.

Таблица 6.3

### Обратная ветвь

№ п/п	$I, \mu\text{A}$	$U, \text{В}$
1	5,0	
2	4,0	
3	3,3	
4	2,3	
5	1,15	
6	0,2	
7	0,1	

7. По полученным результатам построить вольт-амперную характеристику диода с интерполяцией неизвестных участков.

### Форма отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и применяемое оборудование.
2. Электрические принципиальные схемы, по которым проводился эксперимент.
3. Результаты измерений и расчетов.
4. Графическое изображение вольт-амперной характеристики стабилитрона.
5. Ответы на контрольные вопросы (по указанию преподавателя).

### Литература

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

## Контрольные вопросы

1. Поясните принцип выбора схемы измерения сопротивления резистора методом амперметра-вольтметра.
2. Как оценить погрешность измерения напряжения, если известны классы точности амперметра ( $k_{TA}$ ) и вольтметра ( $k_{TV}$ )?
3. Что такое погрешность дискретности (квантования)?
4. Поясните, каким образом можно уменьшить погрешность параллакса.
5. Как влияет сопротивление индикатора в диагонали мостовой схемы на точность измерения неизвестного сопротивления?
6. Можно ли использовать мостовую схему измерения сопротивления на переменном токе?
7. Поясните понятие «пятка» в полупроводниковом диоде.
8. Как оценить качество стабилизатора напряжения, составленного из резистора и стабилитрона?
9. По каким признакам полупроводниковые диоды разделяют на выпрямительные и стабилитроны?
10. Поясните физические процессы в стабилитроне на участке электрического пробоя.
11. Чем определяется сопротивление полупроводникового диода на прямой ветви при напряжениях, превышающих величину диодной пятки?
12. Как соотносятся между собой в полупроводниковом диоде токи диффузии и дрейфа, если температура постоянна?
13. Как влияет внутреннее сопротивление амперметра на точность выявления характеристики стабилитрона?
14. Как изменится ток в измерительной диагонали уравновешенного моста, если напряжение питания уменьшить?
15. Какие приборы называют логометрами? Поясните их устройство и принцип действия.
16. Что называют операционным усилителем и каковы его основные параметры?

## Лабораторная работа № 7 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

**Цель работы:** ознакомиться с существующими методами обработки результатов измерений; освоить практические навыки по проведению эксперимента и выявлению метрологических параметров исследуемого объекта.

**Оборудование:**

1. Понижающий трансформатор силовой электрической сети ( $U_{\text{вых}} = 8 \text{ В}$ ).
2. Частотомер электронно-счетный VC3165.

### Теоретическая часть

Присутствие случайных погрешностей в результатах измерений легко обнаружить из-за их разброса относительно некоторого значения. Результат измерения и его погрешность с известными оговорками можно рассматривать как случайные величины.

Из теории вероятности известно, что наиболее универсальный способ описания случайных величин – поиск их интегральных или дифференциальных функций распределения. *Интегральной функцией распределения*  $F(x)$  называют функцию, каждое значение которой для каждого  $x$  предстает вероятностью события, заключающегося в том, что случайная величина  $x_i$  в  $i$ -м опыте принимает значение, меньшее  $x$ :

$$F(x) = P\{x_i < x\} = P\{-\infty < x_i < x\} \quad (7.1)$$

График интегральной функции распределения показан на рис. 7.1. Она имеет следующие свойства:

- неотрицательная, т. е.  $F(x) \geq 0$ ;
- неубывающая, т. е.  $F(x_2) \geq F(x_1)$ , если  $x_2 > x_1$
- диапазон ее изменения простирается от 0 до 1, т. е.  $F(-\infty) = 0$ ;  
 $F(+\infty) = 1$ ;
- вероятность нахождения случайной величины  $x$  в диапазоне от  $x_1$  до  $x_2$ :

$$P\{x_1 < x < x_2\} = F(x_2) - F(x_1).$$

Более наглядно описание свойств результатов измерений и случайных погрешностей с помощью *дифференциальной функции рас-*

предела, иначе называемой плотностью распределения вероятностей  $p(x) = dF(x)/dx$ . Она всегда неотрицательна и подчиняется условию нормирования в виде  $\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1$ .

Учитывая взаимосвязь  $F(x)$  и  $p(x)$ , легко показать, что вероятность попадания случайной величины в заданный интервал  $(x_1; x_2)$

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

Следовательно, рассмотренное выше условие нормирования означает, что вероятность попадания величины  $x$  в интервал  $[-\infty; +\infty]$  равна единице, т. е. представляет собой достоверное событие.

Из последнего уравнения следует, что вероятность попадания случайной величины  $x$  в заданный интервал  $(x_1; x_2)$  равна площади, заключенной под кривой  $p(x)$  между абсциссами  $x_1$  и  $x_2$  (рис. 7.1), поэтому по форме кривой плотности вероятности  $p(x)$  можно судить о том, какие значения случайной величины  $x$  наиболее вероятны, а какие – наименее.

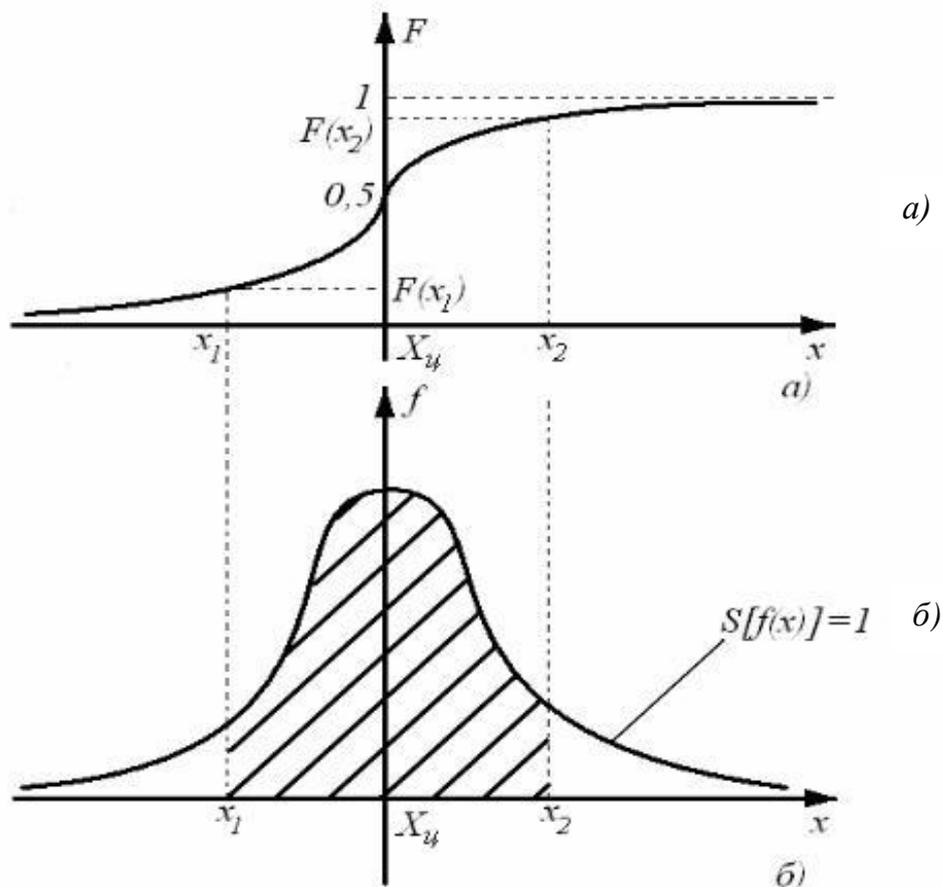


Рис. 7.1. Функции распределения случайной величины:  
 а – интегральная; б – дифференциальная

Как отмечалось выше, функции распределения – самый универсальный способ описания поведения результатов измерений и случайных погрешностей. Однако для их определения необходимо проведение весьма длительных и кропотливых исследований и вычислений. В большинстве случаев бывает достаточно охарактеризовать случайные величины с помощью ограниченного числа специальных параметров, основные из которых:

- центр распределения;
- начальные и центральные моменты и производные от них коэффициенты: математическое ожидание, СКО, эксцесс, контрэксцесс и коэффициент асимметрии;
- энтропийный коэффициент.

Координата центра распределения показывает положение случайной величины на числовой оси, и ее можно найти несколькими способами. Наиболее фундаментальным считают центр симметрии, т. е. нахождение такой точки  $X_M$  на оси  $x$ , слева и справа от которой вероятности появления различных значений случайной величины одинаковы и равны 0,5:

$$F(X_M) = \int_{-\infty}^{X_M} p(x)dx = \int_{X_M}^{+\infty} p(x)dx = 0,5.$$

Точку  $X_M$  называют 50%-ным квантилем. Для ее нахождения у распределения случайной величины должен существовать только нулевой начальный момент.

Можно определить центр распределения как центр тяжести распределения, т. е. такой точки  $\bar{X}$ , относительно которой опрокидывающий момент геометрической фигуры, огибающей которой служит кривая  $p(x)$ , равен нулю:

$$\bar{X} = m_x = a_1[x] = M[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx.$$

Эта точка называется *математическим ожиданием (МО)*. Следует отметить, что у некоторых распределений, например распределения Коши, не существует МО, так как определяющий его интеграл расходится.

При симметричной кривой  $p(x)$  в качестве центра можно использовать абсциссу *моды*, т. е. максимума распределения  $X_M$ . Однако существуют распределения, у которых нет моды, например равно-

мерное. Распределения с одним максимумом называют одномодальными, с двумя – двухмодальными и т. д. Те из них, у которых в средней части расположен не максимум, а минимум, называются антимодальными.

Моменты распределений представляют собой некоторые средние значения, причем если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, то моменты называют начальными, а если от центра распределения – центральными. Начальные и центральные моменты  $r$ -го порядка определяются соответственно по формулам

$$\alpha_r [x] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^r p(x) dx; \mu_r [x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^r p(x) dx.$$

Нулевой начальный момент равен единице. Его используют для задания условия нормирования плотности распределения:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^0 p(x) dx = 1.$$

Также с помощью начального момента нулевого порядка вводят понятие медианы распределения. Первый начальный момент – МО случайной величины

$$m_x = a_1 [x] = M[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x) dx.$$

Для результатов измерений оно представляет собой оценку истинного значения измеряемой величины. Начальные и центральные моменты случайной погрешности совпадают между собой и с центральными моментами результатов измерений, поскольку МО случайной погрешности равно нулю. Следует также отметить, что первый центральный момент тождественно равен нулю.

Важное значение имеет второй центральный момент

$$D[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 p(x) dx,$$

называемый *дисперсией* и представляющий собой характеристику рассеивания случайной величины относительно МО. Значительно чаще в качестве меры рассеивания используют *среднее квадратическое отклонение*  $\sigma = \sqrt{D[x]}$ , имеющее такую же размерность, как и МО. Для примера на рис. 7.2 показан вид нормального распределения при различных значениях СКО.

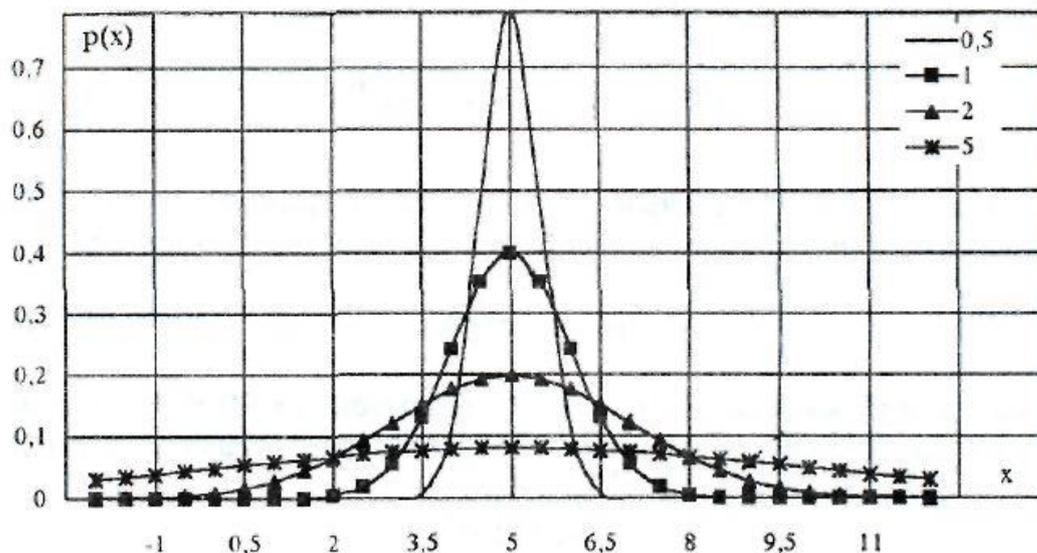


Рис. 7.2. Вид нормального распределения при  $X_{ц} = 5$  и СКО = 0,5; 1; 2 и 5

Математическое ожидание и дисперсия – это наиболее часто применяемые моменты, поскольку они определяют важные черты распределения: положение центра и степень разбросанности результатов относительно него. Для более подробного описания распределения используют моменты более высоких порядков.

Третий центральный момент  $\mu_3[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^3 p(x) dx$  служит характеристикой асимметрии, или скошенности распределения. Он позволяет ввести коэффициент асимметрии  $v = \mu_3[x] / \sigma^3$ . Для нормального распределения коэффициент асимметрии равен нулю.

Использование на практике вероятностного подхода к оценке погрешностей результатов измерений прежде всего предполагает знание аналитической модели закона распределения рассматриваемой погрешности. Встречающиеся в метрологии распределения достаточно разнообразны. В качестве примера можно привести результаты исследований 219 фактических распределений погрешностей, имеющих место при измерении электрических и неэлектрических величин разнообразными приборами. Установлено, что примерно 50 % распределений принадлежат к классу экспоненциальных, 30 % – уплощенных, а остальные 20 % – к различным видам двухмодальных распределений.

Множество законов распределения случайных величин, используемых в метрологии, целесообразно классифицировать следующим образом:

- трапецеидальные (плосковершинные) распределения;

- уплощенные (приблизительно плосковершинные) распределения;
- экспоненциальные распределения;
- семейство распределений Стьюдента;
- двухмодальные распределения.

Наибольшее распространение получил нормальный закон распределения, называемый часто *распределением Гаусса*:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-X_{\text{ц}})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (7.2)$$

где  $\sigma$  – параметр рассеивания распределения, равный СКО;  $X_{\text{ц}}$  – центр распределения, равный МО. Вид нормального распределения показан на рис. 7.2.

Широкое использование нормального распределения на практике объясняется центральной предельной теоремой теории вероятностей, утверждающей, что распределение случайных погрешностей будет близко к нормальному всякий раз, когда результаты наблюдений формируются под действием большого числа независимо действующих факторов, каждый из которых оказывает лишь незначительное действие по сравнению с суммарным действием всех остальных.

При введении новой переменной  $t = (x - X_{\text{ц}})/\sigma$  из (7.2) получается нормированное нормальное распределение, интегральная и дифференциальная функции которого соответственно равны:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-0,5t^2} dt; \quad p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0,5t^2}.$$

Рассмотренные выше функции распределения описывают поведение непрерывных случайных величин, т. е. величин, возможные значения которых неотделимы друг от друга и непрерывно заполняют некоторый конечный или бесконечный интервал. На практике все результаты измерений и случайные погрешности предстают величинами дискретными, т. е. величинами  $x_i$ , возможные значения которых отделимы друг от друга и поддаются счету. При использовании дискретных случайных величин возникает задача нахождения точечных оценок параметров их функций распределения на основании *выборок* – ряда значений  $x_i$ , принимаемых случайной величиной  $x$  в  $n$  независимых опытах. Используемая выборка должна быть *репрезентативной* (представительной), т. е. должна достаточно хорошо представлять пропорции генеральной совокупности.

Оценка параметра называется *точечной*, если она выражается одним числом. Задача нахождения точечных оценок – частный случай статистической задачи нахождения оценок параметров функции распределения случайной величины на основании выборки. В отличие от самих параметров их точечные оценки – случайные величины, причем их значения зависят от объема экспериментальных данных, а закон распределения – от законов распределения самих случайных величин.

Точечные оценки могут быть состоятельными, несмещенными и эффективными. *Состоятельной* называется оценка, которая при увеличении объема выборки стремится по вероятности к истинному значению числовой характеристики. *Несмещенной* называется оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемой числовой характеристике. Наиболее *эффективной* считают ту из нескольких возможных несмещенных оценок, которая имеет наименьшую дисперсию.

Наиболее распространенный метод получения оценок – метод наибольшего правдоподобия, который приводит к асимптотически несмещенным и эффективным оценкам с приближенно нормальным распределением. Среди других методов можно назвать методы моментов и наименьших квадратов.

Точечной оценкой МО результата измерений предстает *среднее арифметическое значение* измеряемой величины

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.3)$$

При любом законе распределения оно считается состоятельной и несмещенной оценкой, а также наиболее эффективной по критерию наименьших квадратов.

Точечная оценка дисперсии, определяемая по формуле

$$\tilde{D}[x] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (7.4)$$

является несмещенной и состоятельной.

Полученные оценки МО и СКО – случайные величины. Это проявляется в том, что при повторениях серий из  $n$  наблюдений каждый раз будут получаться различные оценки  $\bar{X}$  и  $\tilde{\sigma}$ . Рассеяние этих оценок целесообразно оценивать с помощью СКО  $S_{\bar{x}}$  и  $S_{\sigma}$ . Оценка СКО среднего арифметического значения

$$S_x = \frac{S_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (7.5)$$

Оценка СКО среднего квадратического отклонения

$$S_{\sigma} \approx \tilde{\sigma}(S_x) = S_x \sqrt{\varepsilon - 1} / (2\sqrt{n}).$$

Отсюда следует, что относительная погрешность определения СКО может быть оценена как

$$\frac{S_{\sigma}}{S_x} = \sqrt{\varepsilon - 1} / (2\sqrt{n}).$$

Она зависит только от эксцесса и числа наблюдений в выборке и не зависит от СКО, т. е. той точности, с которой производят измерения. Ввиду того, что большое число измерений проводится относительно редко, погрешность определения может быть весьма существенной. В любом случае она больше погрешности из-за смещенности оценки. На практике пренебрегают учетом смещенности оценки СКО отдельных наблюдений и определяют его по формуле

$$\tilde{\sigma} = S_x \sqrt{\tilde{D}[x]} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (7.6)$$

Рассмотренные точечные оценки параметров распределения дают оценку в виде числа, наиболее близкого к значению неизвестного параметра. Такие оценки используют только при большом числе измерений. Чем меньше объем выборки, тем легче допустить ошибку при выборе параметра. Для практики важно не только получить точечную оценку, но и определить интервал, называемый *доверительным*, между границами которого с заданной *доверительной вероятностью*

$$P\{x_{\text{н}} < x < x_{\text{в}}\} = 1 - q,$$

где  $q$  – уровень значимости;  $x_{\text{н}}$ ,  $x_{\text{в}}$  – нижняя и верхняя границы интервала, в котором находится истинное значение оцениваемого параметра.

В общем случае доверительные интервалы можно строить на основе *неравенства Чебышева*. При любом законе распределения случайной величины, обладающей моментами первых двух порядков, верхняя граница вероятности попадания отклонения случайной величины  $x$  от центра распределения  $X_{\text{ц}}$  в интервал  $tS_x$  описывается неравенством Чебышева

$$P\{|x - X_{\text{ц}}| \leq tS_x\} \leq 1 - 1/t^2,$$

где  $S_x$  – оценка СКО распределения;  $t$  – положительное число.

В метрологической практике используют главным образом *квантильные оценки* доверительного интервала. Под 100%-ным квантилем  $x_p$  понимают абсциссу такой вертикальной линии, слева от которой площадь под кривой плотности распределения равна  $P$  %. Ина-

че говоря, *квантиль* – это значение случайной величины (погрешности) с заданной доверительной вероятностью  $P$ . Например, медиана распределения является 50%-ным квантилем  $x_{0,5}$ .

Расчет доверительных интервалов для случая, когда распределение результатов наблюдений нормально, но их дисперсия неизвестна, т. е. при малом числе наблюдений  $n$ , возможно выполнить с использованием распределения Стьюдента  $S(t, k)$ . Оно описывает плотность распределения отношения (дроби Стьюдента):

$$t = \frac{\bar{x} - m[x]}{S_{\bar{x}}} = \frac{\bar{x} - Q}{S_{\bar{x}}} = \sqrt{n} \frac{\bar{x} - Q}{S_x},$$

где  $q$  – истинное значение измеряемой величины. Величины  $\bar{X}$ ,  $S_x$  и  $S_{\bar{x}}$  вычисляются на основании опытных данных и представляют собой точечные оценки МО, СКО результатов измерений и СКО среднего арифметического значения.

Вероятность того, что дробь Стьюдента в результате выполненных наблюдений примет некоторое значение в интервале  $(-t_p; +t_p)$  равна

$$\begin{aligned} P \left\{ -t_p < \frac{\bar{x} - Q}{S_x} < +t_p \right\} &= P \left\{ |\bar{x} - Q| < \frac{t_p S_x}{\sqrt{n}} \right\} = \\ &= \int_{-t_p}^{+t_p} S(t, k) dt = 2 \int_0^{t_p} S(t, k) dt, \end{aligned} \quad (7.7)$$

где  $k$  – число степеней свободы, равное  $(n - 1)$ . Величины  $t_p$  (называемые в данном случае *коэффициентами Стьюдента*), рассчитанные с помощью двух последних формул для различных значений доверительной вероятности и числа измерений, табулированы (прил. 3). Следовательно, с помощью распределения Стьюдента можно найти вероятность того, что отклонение среднего арифметического от истинного значения измеряемой величины не превышает

$$\Delta_p = t_p S_x = t_p S_x / \sqrt{n}. \quad (7.8)$$

Результат измерения записывается в виде

$$Q = \bar{x} \pm \frac{t S_x}{\sqrt{n}}; P = P_d \quad (7.9)$$

где  $P_d$  – конкретное значение доверительной вероятности. Множитель  $t$  при большом числе измерений  $n$  равен квантильному множителю  $Z_p$ . При малом  $n$  он равен коэффициенту Стьюдента.

Полученный результат измерения (7.9) – это не одно конкретное число, а интервал, внутри которого с некоторой вероятностью  $P_d$  находится истинное значение измеряемой величины. Выделение се-

редины интервала  $\bar{X}$  вовсе не предполагает, что истинное значение ближе к нему, чем к остальным точкам интервала. Оно может быть в любом месте интервала, а с вероятностью  $1 - P_d$  даже вне его.

*Грубая погрешность, или промах*, – это погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Источником грубых погрешностей нередко бывают резкие изменения условий измерения и ошибки, допущенные оператором. К ним можно отнести:

- неправильный отсчет по шкале измерительного прибора, происходящий из-за неверного учета цены малых делений шкалы;
- неправильная запись результата наблюдений, значений отдельных мер использованного набора, например гирь;
- хаотические изменения параметров питающего СИЗ напряжения, например его амплитуды или частоты.

Корректная статистическая обработка выборки возможна только при ее однородности, т. е. в том случае, когда все ее члены принадлежат к одной и той же генеральной совокупности. В противном случае обработка данных бессмысленна. «Чужие» отсчеты по своим значениям могут существенно не отличаться от «своих». Их можно обнаружить только по виду гистограмм или дифференциальных законов распределения. Наличие таких аномальных отсчетов принято называть *загрязнениями* выборки.

Вопрос о том, содержит ли результат наблюдений грубую погрешность, решается общими методами проверки статистических гипотез. Проверяемая гипотеза состоит в утверждении, что результат наблюдения  $x_4$  не содержит грубой погрешности, т. е. предстает одним из значений измеряемой величины. Пользуясь определенными статистическими критериями, пытаются опровергнуть выдвинутую гипотезу. Если это удастся, то результат наблюдений рассматривают как содержащий грубую погрешность и его исключают.

Для выявления грубых погрешностей задаются вероятностью  $q$  (уровнем значимости) того, что сомнительный результат действительно мог иметь место в данной совокупности результатов измерений.

*Критерий «трех сигм»* применяют для результатов измерений, распределенных по нормальному закону. По этому критерию считают, что результат, возникающий с вероятностью  $q \leq 0,003$ , маловеро-

ятен и его можно считать промахом, если  $|\bar{X} - x_i| > 3S_x$ , где  $S_x$  – оценка СКО измерений. Величины  $\bar{X}$  и  $S_x$  вычисляют без учета экстремальных значений  $x_i$ . Данный критерий надежен при числе измерений  $n \geq 20 \dots 50$ .

Это правило обычно считается слишком жестким, поэтому рекомендуют назначать границу цензурирования в зависимости от объема выборки.

В общем случае границы цензурирования  $t_{гр} S_x$  выборки зависят не только от объема  $n$ , но и от вида распределения. Назначая ту или иную границу, необходимо оценить уровень значимости  $q$ , т. е. вероятность исключения какой-либо части отсчетов, принадлежащих обрабатываемой выборке.

*Вариационный критерий Диксона* удобен и достаточно мощен (с малыми вероятностями ошибок). При его применении полученные результаты наблюдений записывают в вариационный возрастающий ряд  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ( $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ ). Критерий Диксона определяется как  $K_D = (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1)$ . Критическая область для этого критерия

$$P(K_D > Z_q) = q. \quad (7.10)$$

Значения  $Z_q$  приведены в прил. 4.

Первый шаг при идентификации закона распределения – это построение по исправленным результатам измерений  $x_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ , вариационного ряда (упорядоченной выборки). В вариационном ряду результаты измерений (или их отклонения от среднего арифметического) располагают в порядке возрастания. Далее этот ряд разбивается на оптимальное число  $m$ .

Оптимально такое число интервалов  $m$ , при котором возможное максимальное сглаживание случайных флуктуаций данных сопровождается с минимальным искажением от сглаживания самой кривой искомого распределения. Для практического применения целесообразно использовать выражения

$$m_{\min} = 0,55n^{0,4} \text{ и } m_{\max} = 1,25n^{0,4}, \quad (7.11)$$

которые получены для наиболее часто встречающихся на практике распределений с эксцессом, находящимся в пределах от 1,8 до 6, т. е. от равномерного до распределения Лапласа.

Далее подсчитывают число попаданий  $n_k$  (*частоты*) результатов измерений в каждый интервал группирования. Сумма этих чисел должна равняться числу измерений. По полученным значениям рассчитывают вероятности попадания результатов измерений (*частоты*) в каждый из интервалов группирования по формуле

$$P_k = n_k / n, \quad (7.12)$$

где  $k = 1, 2, \dots, m$ .

Проведенные расчеты позволяют построить гистограмму, полигон и кумулятивную кривую. Для построения *гистограммы* по оси результатов наблюдений  $x$  (рис. 7.3, *а*) откладывают интервалы  $\Delta_i$  в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строится прямоугольник высотой  $P_k$ . Площадь, заключенная под графиком, пропорциональна числу наблюдений  $n$ . При увеличении числа интервалов и соответственно уменьшении их длины гистограмма все более приближается к гладкой кривой – графику плотности распределения вероятности.

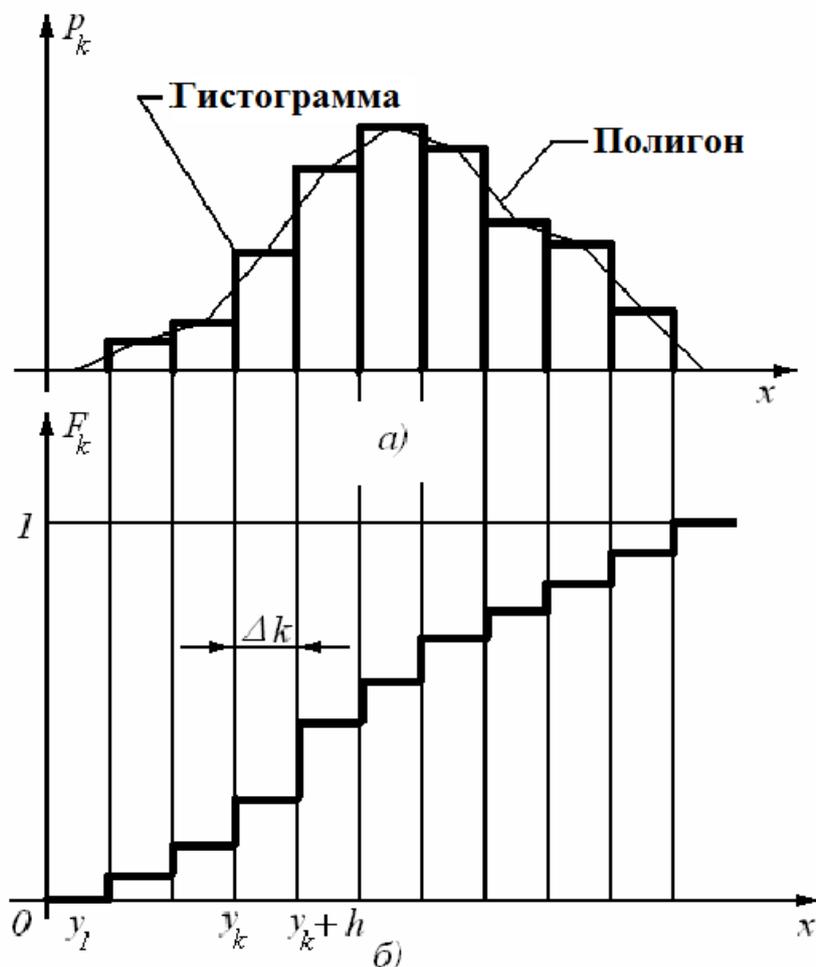


Рис. 7.3. Гистограмма: *а* – полигон; *б* – кумулятивная кривая

*Полигон* представляет собой ломаную кривую, соединяющую середины верхних оснований каждого столбца гистограммы (см. рис. 7.3, а). Он более наглядно, чем гистограмма, отражает форму кривой распределения. За пределами гистограммы справа и слева остаются пустые интервалы, в которых точки, соответствующие их серединам, лежат на оси абсцисс.

Эти точки при построении полигона соединяют между собой отрезками прямых линий. В результате совместно с осью  $x$  образуется замкнутая фигура, площадь которой в соответствии с правилом нормирования должна быть равна единице (или числу наблюдений при использовании частостей).

*Кумулятивная кривая* – это график статистической функции распределения. Для ее построения по оси результатов наблюдений  $x$  (рис. 7.3) откладывают интервалы  $\Delta_i$  в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строят прямоугольник высотой

$$F_k = \sum_{k=1}^k P_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^k n_k. \quad (7.13)$$

Значение  $F_k$  называется *кумулятивной частотью*, а сумма  $n_k$  – *кумулятивной частотой*.

По виду построенных зависимостей можно оценить закон распределения результатов измерений.

В качестве способа оценки близости распределения выборки экспериментальных данных к принятой аналитической модели закона распределения используют критерии согласия. Наибольшее распространение в практике получил *критерий Пирсона*. Идея этого метода состоит в контроле отклонений гистограммы экспериментальных данных от гистограммы с таким же числом интервалов, построенной на основе распределения, совпадение с которым определяется. Использование критерия Пирсона возможно при большом числе измерений и заключается в вычислении величины  $\chi^2$  (хи-квадрат):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - N_i)^2}{N_i} = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - nP_i)^2}{nP_i}, \quad (7.14)$$

где  $n_i$ ,  $N_i$  – экспериментальные и теоретические значения частот в  $i$ -м интервале разбиения;  $m$  – число интервалов разбиения;  $P_i$  – значения вероятностей в том же интервале разбиения, соответствующие выбранной модели распределения  $n = \sum_{i=1}^m n_i$ .

При  $n \rightarrow \infty$  случайная величина  $\chi^2$  имеет распределение Пирсона с числом степеней свободы

$$v = m - 1 - r, \quad (7.15)$$

где  $r$  – число определяемых по статистике параметров, необходимых для совмещения модели и гистограммы. Для нормального закона распределения  $r = 2$ , так как закон однозначно характеризуется указанием двух его параметров – математического ожидания и СКО.

Если бы выбранная модель в центрах всех  $m$  столбцов совпадала с экспериментальными данными, то все  $m$  разностей  $(n_i - N_i)$  были бы равны нулю, а следовательно, и значение критерия  $\chi^2$  также было бы равно нулю. Таким образом,  $\chi^2$  есть мера суммарного отклонения между моделью и экспериментальным распределением.

Критерий  $\chi^2$  не инвариантен к числу столбцов и существенно возрастает с увеличением их количества. Поэтому для использования его при разном числе столбцов составлены таблицы квантилей распределения  $\chi^2$ , входом в которые служит  $v$  (7.15). Чтобы совместить модель, соответствующую нормальному закону, с гистограммой, необходимо совместить координату центра, а для того, чтобы ширина модели соответствовала ширине гистограммы, ее нужно задать как  $r = 2$  и  $v = m - 3$ . Часть квантилей распределения  $\chi^2_q$  приведена в прил. 5.

Если вычисленная по опытным данным мера расхождения  $\chi^2$  меньше определенного из таблицы значения  $\chi^2_q$ , то гипотеза о совпадении экспериментального и выбранного теоретического распределений принимается.

Методика определения соответствия экспериментального и принятого законов распределения заключается в следующем:

- определяют оценки среднего арифметического значения  $\bar{x}$  и СКО  $S_{\bar{x}}$  по формулам (7.3) и (7.6);
- группируют результаты многократных наблюдений по интервалам длиной  $\Delta$ , число которых определяют так же, как и при построении гистограммы;
- для каждого интервала разбиения определяют его центр  $x_{i0}$  и подсчитывают число наблюдений  $n_i$ , попавших в каждый интервал;
- вычисляют число наблюдений для каждого из интервалов, теоретически соответствующее выбранной аналитической модели распределения. Для этого сначала от реальных середин интервалов  $x_{i0}$  производят переход к нормированным серединам  $z_i = (x_{i0} - \bar{x})/S_x$ . Затем для каждого значения  $z_i$  с помощью аналитической модели

находят значение функции плотности вероятностей  $f(z_i)$ . Например, для нормального закона

$$f(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z_i^2/2}.$$

По найденному значению  $f(z_i)$  определяют ту часть  $N_i$  имеющих наблюдения, которая теоретически должна быть в каждом из интервалов  $N_i = n\Delta f(z_i)/S_x$ , где  $n$  – общее число наблюдений;

- если в какой-либо интервал теоретически попадает меньше пяти наблюдений, то в обеих гистограммах его соединяют с соседним интервалом. После этого определяют число степеней свободы  $\nu$  (7.15);

- по формуле (7.14) определяют показатель разности частот  $\chi^2$ ;

- выбирают уровень значимости критерия  $q$ . Он должен быть небольшим, чтобы была мала вероятность совершить ошибку первого рода. По уровню значимости и числу степеней свободы  $\nu$  (прил. 5) находят границу критической области  $\chi_q^2$  такую, что  $P\{\chi^2 > \chi_q^2\} = q$ . Вероятность того, что полученное значение  $\chi^2$  превышает  $\chi_q^2$ , равна  $q$  и мала. Поэтому, если оказывается, что  $\chi^2 > \chi_q^2$ , гипотеза о совпадении экспериментального и теоретического законов распределения отвергается. Если же  $\chi^2 < \chi_q^2$ , то гипотезу принимают.

Итак, если теоретический закон нормального распределения (закон Гаусса) подтвержден, то результат измерения записывается в виде

$$Q = \bar{x} \pm \Delta p,$$

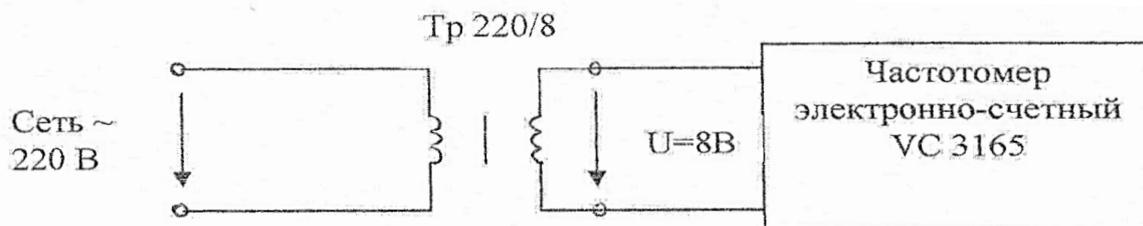
где  $\Delta p = t_p S_{\bar{x}} = t_p S_x / \sqrt{n}$ , здесь  $t_p$  – коэффициент Стьюдента (прил. 3).

4. Ответы на контрольные вопросы (по указанию преподавателя).

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с частотомером электронно-счетным VC3165, используя инструкцию по эксплуатации (прил. 6).

2. Собрать схему измерений периода колебаний ЭДС силовой сети и провести эксперимент по измерению искомой величины  $T$ .



Записать генеральную совокупность результатов из 30 измерений.

3. Провести обработку результатов эксперимента, приняв уровень значимости  $q = 0,05$  и доверительную вероятность  $P = 0,95$ :

– пользуясь формулами (7.3), (7.5) и (7.6) вычислить точечные оценки закона распределения;

– исключить грубые погрешности, пользуясь вариационным критерием Диксона (7.10);

– построить гистограмму, полигон и кумулятивную кривую, пользуясь формулами (7.10), (7.11) и (7.13);

– оценить близость распределения выборки экспериментальных данных к принятой модели распределения (закону Гаусса) по критерию Пирсона, пользуясь квантилем распределения (7.14);

– оформить конечный результат измерения (7.9), округлив до 6-го знака после запятой.

### **Форма отчета**

Отчет должен содержать:

1. Схему измерения.
2. Расчеты по п. 3 порядка выполнения работы.
3. Графики гистограммы, полигона и кумулятивной кривой.

### **Литература**

Сергеев, А. Г. Метрология / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М. : Логос, 2000. – 408 с. – ISBN 5-94010-039-2.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. При каких условиях погрешность измерения можно рассматривать как случайную величину?

2. Перечислите свойства интегральной и дифференциальной функций распределения случайной величины.

3. Назовите числовые параметры законов распределения.
4. Каким образом можно задавать центр распределения?
5. Что такое моменты распределения? Какие из них нашли применение в метрологии?
6. Назовите основные классы распределений, используемых в метрологии.
7. Что такое нормальное распределение? Почему оно играет особую роль в метрологии?
8. Как описывают и где используют семейство распределений Стьюдента?
9. Какие точечные оценки законов распределений вы знаете? Какие требования к ним предъявляют?
10. Что такое доверительный интервал? Какие способы его задания вам известны?
11. Что такое грубые погрешности и промахи? Как определить их присутствие в выборке по виду закона распределения или гистограмме?
12. Расскажите о критерии «трех сигм» и его модификациях.
13. Расскажите об использовании вариационного критерия Диксона для нахождения промахов.
14. Что такое условия измерений? Какие они бывают?
15. Что такое результат измерения и чем он характеризуется?

## Лабораторная работа № 8

### КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

**Цель работы:** ознакомиться со структурой различных комплексных средств измерений и освоить практические навыки по измерениям на основе компьютерной измерительной системы.

**Оборудование:**

1. Персональный компьютер (ПК).
2. Функциональный генератор VC2002.
3. Компьютерная измерительная система (КИС), модель БЛМ01.

### Теоретическая часть

Комплексные средства измерения предназначены для реализации всей процедуры измерения. Согласно классификации по роли в процессе измерения и выполняемым функциям к ним относят измерительные приборы и установки, измерительные системы и измерительно-вычислительные комплексы.

*Измерительный прибор* – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне ее измерения и выработки сигнала измерительной информации, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Данный класс средств измерений включает большое количество приборов, различающихся измеряемыми величинами, областью применения, техническими характеристиками, принципом действия, используемой элементарной базой и другими особенностями. Тем не менее все эти приборы имеют некоторые общие черты. Обобщенная структурная схема измерительного прибора показана на рис. 8.1. Измеряемые ФВ воздействуют на *устройство преобразования*, состоящее из первичного измерительного преобразователя и совокупности элементарных средств измерений. Первичный преобразователь преобразует измеряемую ФВ в другую величину, однородную или неоднородную с ней. Сигнал с выхода преобразователя происходит через совокупность элементарных СИз. В простейших измерительных приборах такая совокупность может отсутствовать. Например, в аналоговых вольтметрах измеряемое напряжение преобразуется в угол поворота стрелки с помощью первичного электрохимического ИП.

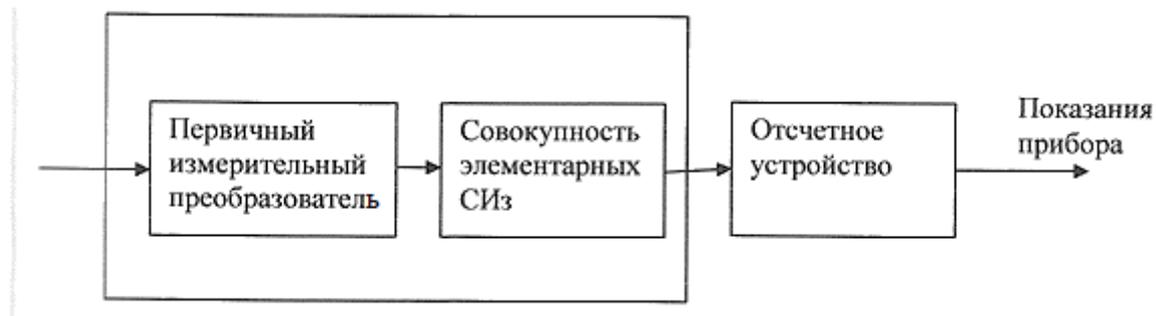


Рис. 8.1. Обобщенная структурная схема измерительного прибора

На выходе устройства преобразования формируется сигнал, параметры которого соответствуют входным характеристикам отсчетного устройства.

*Отсчетное устройство* – это элемент СИз, преобразующий измерительный сигнал в форму, доступную восприятию органам чувств человека. По форме представления показаний отсчетные устройства делят на аналоговые и цифровые.

Составные части отсчетного устройства – это шкала и указатель.

*Шкала* – это часть отсчетного устройства, представляющая собой ряд отметок, соответствующих последовательному ряду значений величины вместе со связанной с ней нумерацией. Шкалу наносят на прямолинейный участок или дугу окружности. *Отметка шкалы* – это знак на шкале СИз (черточка, зубец, точка и т. д.), соответствующий некоторому значению ФВ. Для цифровых шкал сами числа служат эквивалентами отметок шкалы. Отметка шкалы СИз, у которой представлено число отсчета, называется *числовой отметкой шкалы*. Отметки облегчают оператору считывание показаний прибора, которое производится по желанию указателя относительно отметок шкалы. Деления шкалы имеют цены. *Цена деления шкалы* – это разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы СИз. Отметки наносят на шкалу при градуировке прибора, т. е. при подаче на него сигнала с выхода образцовой многозначной меры. У части отметок шкалы проставляются числовые значения величины, подаваемой с выхода меры. Эти отметки становятся числовыми.

*Указатель* – часть отсчетного устройства, положение которого относительно отметок шкалы определяет показания измерительного прибора. Указатель выполняют в виде подвижных стрелок разной формы (клиновидной, ножевидной и др.), луча света, пера самописца и т. п.

При измерении с показывающего устройства считывается *показание*. Каждое СИз характеризуется диапазоном показаний и диапазоном измерений. *Диапазоном показаний* называют область значений шкалы СИз, ограниченную ее начальным и конечным делениями. Так, для медицинского термометра диапазон показаний составляет 7,7 °С. *Диапазоном измерений* называют область значений ФВ, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИз. Значения величины, ограничивающие диапазон снизу и сверху (слева и справа), называются соответственно нижним и верхним *пределами измерений*. Диапазон измерений всегда меньше диапазона показаний или равен ему. Для учета всех особенностей многообразных измерительных приборов применяют классификацию по различным признакам.

По *форме индикации измеряемой величины* различают измерительные приборы:

– *показывающие*, которые допускают только отсчитывание показаний измеряемой величины, например стрелочный или цифровой вольтметр;

– *регистрирующие*, предусматривающие регистрацию показаний на том или ином носителе информации, например на бумажной ленте. Регистрация может производиться в аналоговой или цифровой форме. Различают самопишущие и печатающие приборы.

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

По *назначению* измерительные приборы делят на амперметры, вольтметры, омметры, термометры, гигрометры и т. д.

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

*Аналоговые* приборы – это приборы, показания или выходной сигнал которых представляют собой непрерывную функцию измерения измеряемой величины. Идеализированное управление преобразования линейных аналоговых и измерительных приборов имеет вид

$$Y = KX, \quad (8.1)$$

где  $X$  – измеряемая величина;  $Y$ ,  $K$  – показание и коэффициент преобразования прибора соответственно. Следует отметить, что большинство измерительных приборов линейные.

*Цифровые приборы* – это приборы, принцип действия которых основан на квантовании измеряемой или пропорциональной ей величины. Показания таких приборов представлены в цифровой форме. Структурная схема цифрового прибора показана на рис. 8.2.

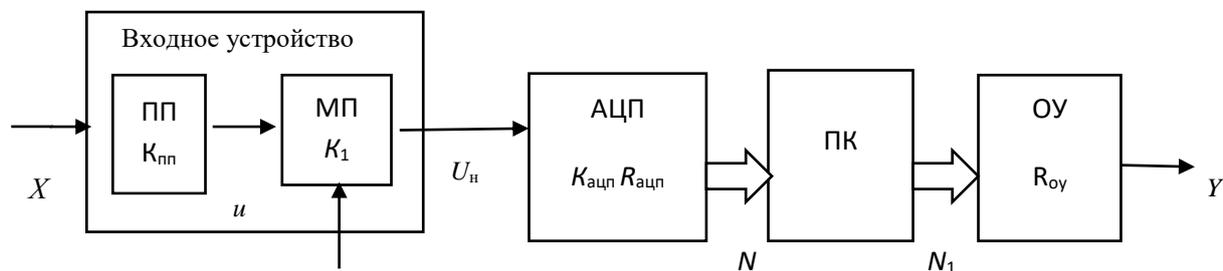


Рис. 8.2. Обобщенная структурная схема цифрового измерительного прибора

Измеряемая физическая величина  $X$  воздействует на первичный измерительный преобразователь (ПП), имеющий коэффициент преобразования  $K_{пп}$ . Он преобразует величину  $X$  в электрический сигнал, в качестве которого используется главным образом напряжение. В рассматриваемом случае  $U = K_{пп}X$ . Это напряжение в свою очередь поступает на масштабный измерительный преобразователь (МП), необходимый для измерения пределов измерения цифрового прибора.

Масштабный преобразователь так изменяет (уменьшает или увеличивает) входное напряжение в заданное число  $K$  раз ( $i = 1; 2; \dots; N_n$ ), чтобы сигнал  $U_n$  на его выходе был нормирован, т. е. его значение находилось в заданных пределах.

Важная характеристика цифрового прибора – метод преобразования аналоговой измеряемой величины в ее цифровой эквивалент, реализованный в аналого-цифровом преобразователе. Принято отождествлять принцип действия цифрового измерительного прибора с принципом действия АЦП, входящего в его состав.

Полученный двоичный цифровой код поступает на преобразователь кодов (ПК). Он необходим для преобразования выходного цифрового кода АЦП в код, «понимаемый» цифровым отсчетным устройством. Наиболее часто в практике встречается преобразование двоичного кода в двоично-десятичный.

Цифровые отсчетные устройства выполняются в виде цифровых табло, дисплеев, основанных на различных физических принципах. Они преобразуют код в показания СИз, понятные человеку.

Согласно каждому из возможных показаний  $Y_i$ , ( $i = 1, \dots, M$ ) ставится в соответствие подмножество  $[X_{Li}; X_{Ri}]$  значений измеряемой величины, где  $X_{Li}$ ;  $X_{Ri}$  – левая и правая границы  $i$ -го подмножества, причем  $X_{Li} - X_{Ri} = g$ . Функция преобразования цифрового прибора (рис. 8.3) имеет вид ступенчатой кривой с разрывами в точках  $X_{Li}$  и  $X_{Ri}$  для  $i$  ( $1; M$ ) (рис. 8.3, а). Кривая должна наилучшим образом приближаться к прямой, которая задается уравнением  $Y = X$  (прямая 1 на рис. 8.3, а и б), описывающую идеальную ситуацию: показания СИЗ равны измеряемой величине. Под наилучшим приближением понимают такое положение ступенчатой кривой, когда абсолютные отклонения ее от прямой 1 минимальны, т. е.

$$|X - X_{Li}| < 0,5q_{xi} \text{ и } |X - X_{Ri}| < 0,5q_{xi}$$

Одна из таких возможностей кривых показаний – на рис. 8.3, б.

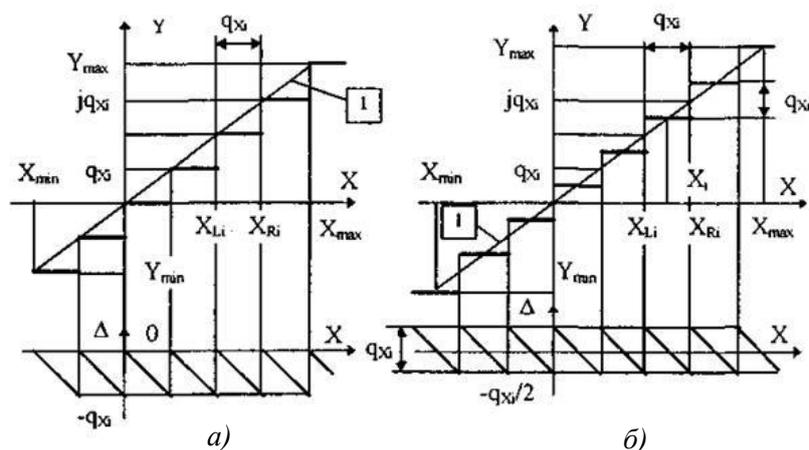


Рис. 8.3. Функции преобразования цифрового прибора и погрешности квантования

В пределах при стремлении кванта  $q_{xi} \rightarrow 0$  оно переходит в уравнение  $Y = X$ . Это свидетельствует о существовании тесной взаимосвязи теории погрешностей аналоговых и цифровых СИЗ.

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

Измерительную установку, предназначенную для испытания каких-либо изделий, называют *испытательным стендом* (например, для измерений удельного сопротивления электрических материалов, испытания магнитных материалов).

Измерительную установку с включенными в нее эталонами, применяемую для проверки СИз, называют *поверочной установкой* (например, установку для поверки вольтметров).

Усложнение современного производства, развитие научных исследований привели к необходимости измерять и контролировать одновременно сотни и тысячи различных физических величин. Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке больших объемов информации стала одной из причин появления таких СИз, как измерительные системы.

*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. Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для контроля технологического процесса производства какого-либо изделия, например стали, электроэнергии и т. п.

Важная их разновидность – *информационно-измерительные системы* (ИИС), предназначенные для представления измерительной информации в виде, необходимом потребителю. По *организации алгоритма функционирования* различают системы:

- с *заранее заданным алгоритмом работы*, правила функционирования которых не меняются, поэтому их можно использовать только для исследования объектов, работающих в постоянном режиме;

- *программируемые*, алгоритм работы которых меняется по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;

- *адаптивные*, алгоритм работы которых (а в ряде случаев и структура) изменяется, приспособляясь к преобразованиям измеряемых величин и условиям работы объекта.

Наиболее перспективным методом разработки и производства ИИС предстает *метод агрегатно-модульного построения* из сравнительно ограниченного набора унифицированных, конструктивно законченных узлов или блоков. При построении агрегатированных систем должны быть решены задачи совместимости и сопряжения блоков как между собой, так и с внешними устройствами. Применительно к ИИС существует пять видов совместимости:

- *информационная*, которая предусматривает согласованность входных и выходных сигналов по видам и номенклатуре, информативным параметрам и уровням;

- *конструктивная*, обеспечиваемая согласованностью эстетических требований, конструктивных параметров, механических сопряжений блоков при их совместном использовании;

- *энергетическая*, предполагающая согласованность напряжений и токов, питающих блоки;

- *метрологическая*, обеспечивающая сопоставимость результатов измерений, рациональный выбор и нормирование метрологических характеристик блоков, а также согласование параметров входной и выходных цепей;

- *эксплуатационная*, т. е. согласованность характеристик блоков по надежности и стабильности, а также характеристик, определяющих влияние внешних факторов. Важная разновидность ИИС – *измерительно-вычислительные комплексы (ИВК)* – функционально объединенная совокупность средств измерений, компьютеров и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения конкретной измерительной задачи. Основные признаки принадлежности средства измерений к ИВК – наличие процессора или компьютера; программное управление средствами измерений; наличие нормированных метрологических характеристик; блочно-модульная структура, состоящая из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

Большое значение имеет эффективное и наглядное построение экранных форм и управляющих элементов, называемых *интерфейсом пользователя*, обеспечивающих взаимодействие оператора с компьютером. Эффективность интерфейса заключается в быстром, насколько это возможно, развитии у пользователей простой концептуальной модели взаимодействия с комплексом. Другими важными характеристиками интерфейса предстают его конкретность и наглядность, что

обеспечивается с помощью последовательно раскрываемых окон, раскрывающихся вложенных меню и командных строчек с указанием функциональных, «горячих» клавиш.

Измерительно-вычислительные комплексы предназначены для выполнения таких функций, как:

- осуществление прямых, косвенных, совместных измерений физических величин;
- управление процессом измерений и воздействий на объект измерений;
- представление оператору результатов измерений в требуемом виде.

Для реализации этих функций ИВК должен обеспечивать:

- восприятие, преобразование и обработку электрических сигналов от первичных измерительных преобразователей;
- управление средствами измерений и другими техническими компонентами, входящими в состав ИВК;
- выработку нормированных сигналов, являющихся входными для средств воздействия на объект;
- оценку метрологических характеристик и представление результатов измерений в установленной форме.

Основные составные части комплекса (рис. 8.4):

- компьютер с периферийными устройствами, подключенными к нему, в том числе и посредством компьютерной сети;
- программное обеспечение, представляющее собой совокупность взаимосвязанных программ, написанных на алгоритмических языках разного уровня;
- интерфейс, организующий связь технических устройств ИВК с компьютером;
- формирователь испытательных сигналов, которыми воздействуют на объект измерения с целью получения измерительных сигналов. Каждый такой сигнал (например, на рис. 8.4 *i*-й) вырабатывается с помощью последовательно соединенных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) и преобразователя «напряжение – испытательный сигнал» (ПНИС);
- измерительные каналы (ИК), предназначенные для преобразования в цифровой код заданного числа сигналов ( $K$  – для первоначального

чального ИК и  $L$  – для  $N$ -го ИК). Структура ИК существенно зависит от решаемой задачи. Однако практически в любом случае каждый из них содержит аналоговый измерительный (АИП) и аналого-цифровой преобразователи. При обработке нескольких измерительных сигналов одним АЦП в состав комплекса включается коммутатор, предназначенный для поочередного подключения сигналов к выходу АЦП. Коммутатор может включаться как после АИП (ИК1 на рис. 8.4), так и перед ним (ИК  $N$  на рис. 8.4).

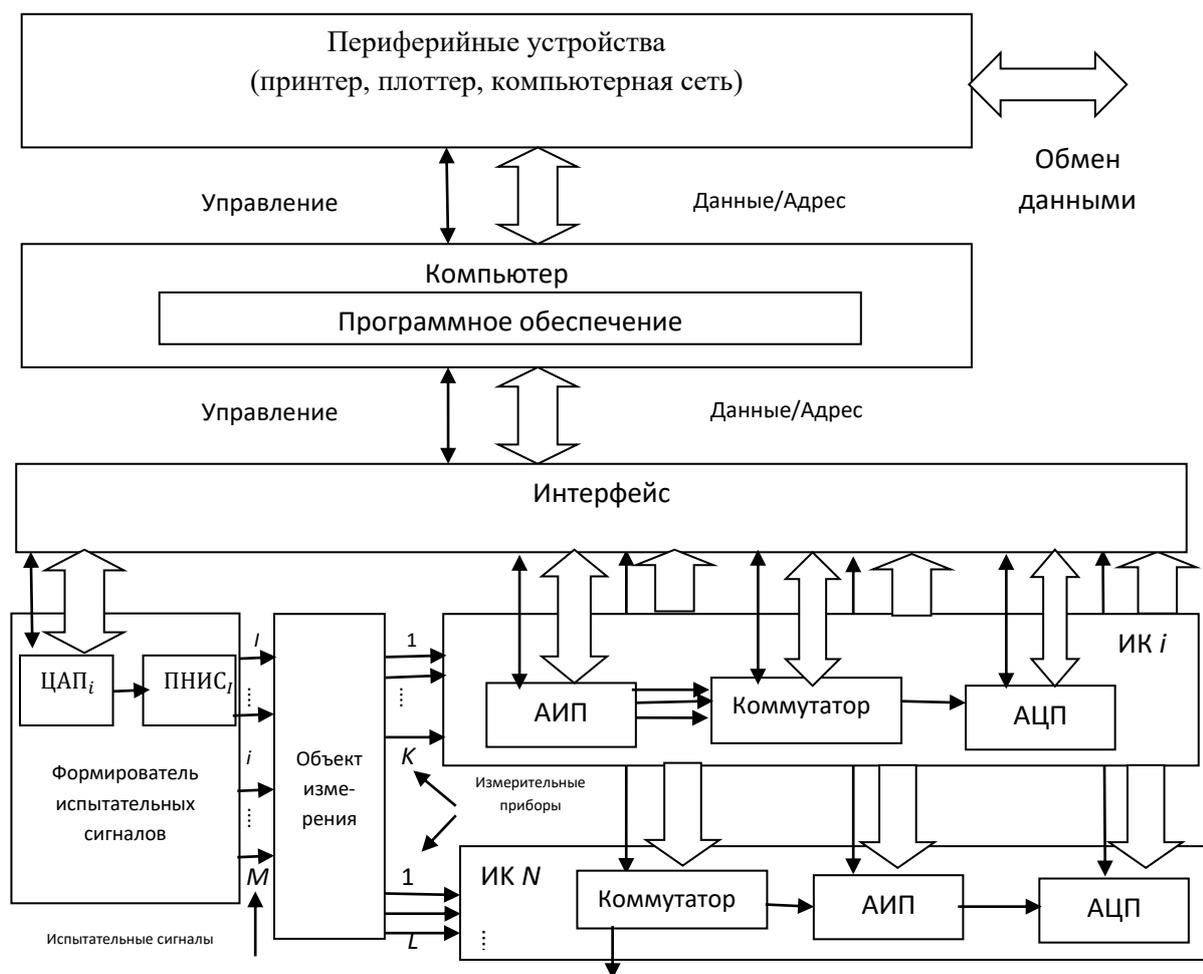


Рис. 8.4. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса

АИП предназначен для преобразования измерительного сигнала в сигнал, однородный с входным сигналом АЦП (т. е. в напряжение), и масштабирования (усиления или ослабления) его до уровня, необходимого для проведения операции аналого-цифрового преобразования с минимальной погрешностью. При наличии нескольких измери-

тельных сигналов ( $K$  сигналов в ИК1 на рис. 8.4) АИП состоит из  $K$  независимых последовательно соединенных первичных преобразователей и управляемых компьютером масштабируемых усилителей. Если же измерительные сигналы представляют собой однородные физические величины и могут быть поочередно выбраны (скоммутированы), то в ИК целесообразно использовать только один АИП (на рис. 8.4 ИК  $N$ ). Он последовательно во времени проводит преобразование измерительного сигнала и последующее его масштабирование.

АЦП преобразует сигнал в цифровой код и передает его через интерфейс в компьютер, который управляет работой всей аппаратной части ИВК. Это осуществляется посредством:

- подачи управляющих сигналов различного рода;
- считывания и передачи по требуемым адресам цифровой информации (сигналы «Данные» и «Адрес» на рис. 8.4.). Под адресом понимается уникальный цифровой код, присвоенный конкретному блоку ИВК или его части и позволяющий компьютеру через интерфейс однозначно идентифицировать данное устройство.

По команде оператора выбирают тот или иной режим работы ИВК из числа реализованных в программном обеспечении. Компьютер рассчитывает цифровой код, описывающий заданное изменение во времени каждого из  $M$  испытательных сигналов, и в виде двоичного цифрового кода записывает в оперативные запоминающие устройства формирователя испытательных сигналов (на рис. 8.4 не показаны). Оттуда эти коды последовательно во времени циклически поступают на вход каждого из ЦАП. Формируемые на их выходах напряжения с помощью ПНИС преобразуются в требуемые физические величины, воздействующие на объект измерения.

Измерительные сигналы, представляющие собой отклик объекта измерения на испытательные воздействия, преобразуются в измерительных каналах в двоичный цифровой код и считываются компьютером. Полученные коды обрабатываются по заданным алгоритмам, в результате получается искомая измерительная информация.

Повторение и изучение СИЗ невозможно без математических моделей, адекватно описывающих те или иные их свойства и характеристики. В метрологии используют моделирование измерительных сигналов и средств измерений.

Математическая модель СИз описывает взаимосвязь его показаний  $Y$  со значением измеряемой величины  $X$ , конструктивными параметрами  $a_1, a_2, \dots, a_L$  и влияющими величинами  $z_1, z_2, \dots, z_k$ :  $Y = F(x; a_1, a_2 \dots a_L; z_1, z_2, \dots, z_k)$ .

Для построения математических моделей (ММ) СИз необходимо знать, как устроены сами СИз и каким образом происходит преобразование измерительных сигналов, т. е. нужно знать структуру СИз. Для сложных СИз, каковы большинство современных приборов, анализ их составных частей и ММ – далеко не простая задача. Для ее оптимального решения, а также для упрощения анализа процессов, протекающих в СИз, ввели понятия структурной схемы и измерительных цепей, канала и тракта.

*Измерительная цепь* – совокупность элементов СИз, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала от входа до выхода и обеспечивающих осуществление всех его преобразований.

*Измерительный канал* – это измерительная цепь, образованная последовательным соединением СИз и других технических устройств, предназначенная для измерения одной величины и имеющая нормированные метрологические характеристики.

*Измерительный тракт* – совокупность измерительных каналов, предназначенных для измерения определенной величины и имеющих одинаковые метрологические характеристики.

*Структурная схема* – условное обозначение измерительной цепи (канала или тракта) СИз с указанием преобразуемых величин. Эта схема определяет основные структурные блоки СИз, их назначение и взаимосвязи.

Основной предпосылкой, использованной при введении этих понятий, было обоснованное допущение о том, что каждое преобразование сигнала происходит в отдельном звене или блоке. Структурные схемы состоят из соединенных определенным образом *структурных элементов (блоков)*, каждый из которых выполняет одну из ряда функций, связанных с измерением. Свойства структурных элементов или их совокупностей описываются с помощью соответствующих уровней, известных из физики, электроники, электротехники и других технических наук.

Основная характеристика структурного элемента – это его *функция (уравнение) преобразования*  $Y = f [X, K_j, Z]$  – уравнение, связывающее между собой входной  $X$  и выходной  $Y$  сигналы элемента, его параметры  $K_j$  и в ряде случаев внешние влияющие величины  $Z_i$ .

Функция преобразования структурного блока служит его математической моделью. Ее вид зависит от того, насколько полно необходимо описать элемент и какие его свойства наиболее важны для исследователя. Например, ММ идеального усилителя можно записать в виде  $U_{\text{вых}}(t) = kU_{\text{вх}}(t)$ , где  $k$  – коэффициент усиления, являющийся постоянным параметром усилителя. Если необходимо учесть напряжение смещения  $U_0$  на его выходе, модель примет вид  $U_{\text{вых}}(t) = kU_{\text{вх}}(t) + U_0$ . Процесс уточнения модели усилителя можно продолжить и дальше. Например, учесть его фазаточные характеристики, влияние внешней температуры и т. д.

Чрезвычайно важным цифровым устройством, все больше и больше применяемым в СИЗ, становится микропроцессор – полупроводниковый прибор, автоматически обрабатывающий цифровую информацию в соответствии с заданной программой и выполненный в виде одной или нескольких интегральных микросхем. Миниатюрные размеры и незначительная схема, малое потребление энергии позволяют включать его непосредственно в электрическую схему измерительного прибора. В СИЗ он выполняет функции приема, обработки и передачи информации, а также управления работой их составных частей.

На структурных схемах элементы изображают в виде прямоугольников, внутри которых написано или каким-то образом условно обозначено их название. Кроме того, на схемах обязательно должно быть показано направление распространения измерительной информации, т. е. обозначены входы и выходы структурных элементов. Часто приводят пояснительные надписи, временные зависимости сигналов в характерных точках, таблицы.

Структурные схемы СИЗ очень разнообразны. Однако в зависимости от соединения элементов структурной схемы различают два основных их вида: прямого и уравнивающего (компенсационного) преобразования измерительного сигнала.

Отличительная черта СИЗ, имеющего структурную схему прямого преобразования (рис. 8.5), состоит в том, что все преобразования измерительного сигнала производятся в прямом направлении. Схема состоит из  $n$  последовательно соединенных блоков.

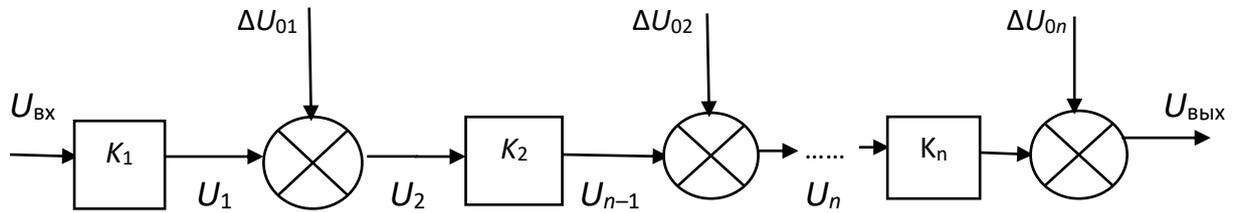


Рис. 8.5. Структурная схема прямого преобразования

На схеме через  $K_1, K_2 \dots, K_n$  обозначены коэффициенты преобразования блоков. Каждый  $i$ -й коэффициент определяется по формуле  $K = dU_i/dU_{i-1}$ , где  $U_{i-1}$  и  $U_i$  – входной и выходной сигналы  $i$ -го блока.

Входной сигнал  $U_{вх}$ , несущий информацию об измеряемой величине, последовательно преобразуется в промежуточные сигналы  $U_1, U_2, \dots, U_{n-1}$  и в выходной сигнал  $U_{вых}$ . В общем случае каждый из них является переменным во времени и может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих.

Особенность уравнивающего, или компенсационного, преобразования состоит в том, что выходная величина средства измерений  $U_{вых}$  (рис. 8.6) подвергается обратному преобразованию в величину  $U'_m$ , однородную с входной величиной  $\Delta U$ . Следовательно, используется отрицательная обратная связь.

Средства измерений, имеющие такую структуру, могут работать в двух режимах: неполного уравнивания, когда сигнал рассогласования  $\Delta = U_{вх} - U'_m \neq 0$ , и полного уравнивания, когда  $\Delta U = 0$ . Рассмотрим сначала первый режим.

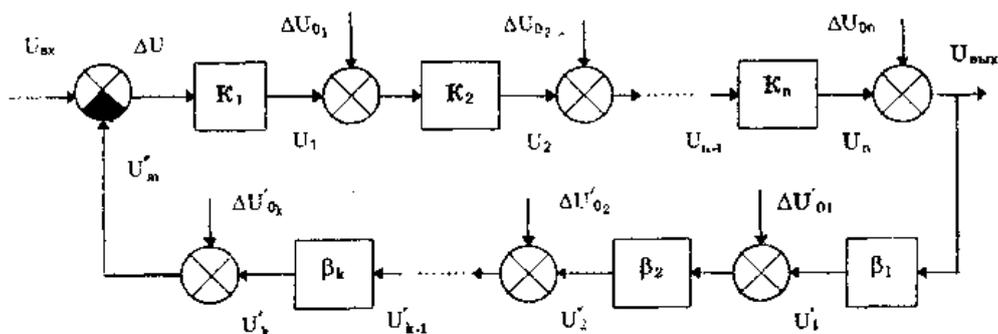


Рис. 8.6. Схема уравнивающего преобразования

Для вывода уравнения преобразования  $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{вх}})$  будем считать справедливыми те упрощающие предположения, которые были приняты при анализе схемы прямого преобразования. При отсутствии помех сигнал рассогласования  $\Delta U$  поступает на вход измерительной цепи прямого преобразования. Ее выходной сигнал

$$U_{\text{вых}} = \Delta U K = \Delta U \prod_{i=1}^n K_i, \quad (8.2)$$

где  $K$  – коэффициент преобразования  $i$ -го структурного элемента цепи прямого преобразования, входной для цепи обратного преобразования. Ее выходное напряжение

$$U = \beta U = \prod_{i=1}^k \beta, \quad (8.3)$$

где  $\beta$  – коэффициент преобразования  $i$ -го структурного элемента цепи обратного преобразования.

Коэффициент преобразования СИЗ с учетом двух последних уравнений имеет вид

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = K \Delta U / \Delta U + U_m = K \Delta U / \Delta U + \beta K \Delta U = K / 1 + \beta K \quad (8.4)$$

а уравнение преобразования соответственно

$$U_{\text{вых}} = K / (1 + \beta K) U_{\text{вх}}. \quad (8.5)$$

Следовательно, выходной сигнал зависит от коэффициентов преобразования цепей прямого и обратного преобразования. При  $+\beta K \gg 1$  выходное напряжение  $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}} / \beta$ , цепь прямого преобразования практически не влияет на работу прибора, поэтому нестабильность коэффициентов преобразования  $K_j$  не вызывает погрешности измерения.

Схемы СИЗ зачастую могут быть комбинированными, т. е. содержать цепь прямого преобразования, звенья которой охвачены отрицательной обратной связью. Следует отметить, что принцип построения структурной схемы влияет на многие параметры СИЗ, такие как входные и выходные сопротивления, динамические и другие характеристики.

Все комплексные средства измерений, в том числе и компьютерная измерительная система, воспринимают и обрабатывают информативные параметры сигнала.

Рассмотрим три вида сигналов.

На рис. 8.7 показан график мгновенных значений ЭДС цепи синусоидального тока. Напряжения на элементах цепи будут иметь такую же форму.

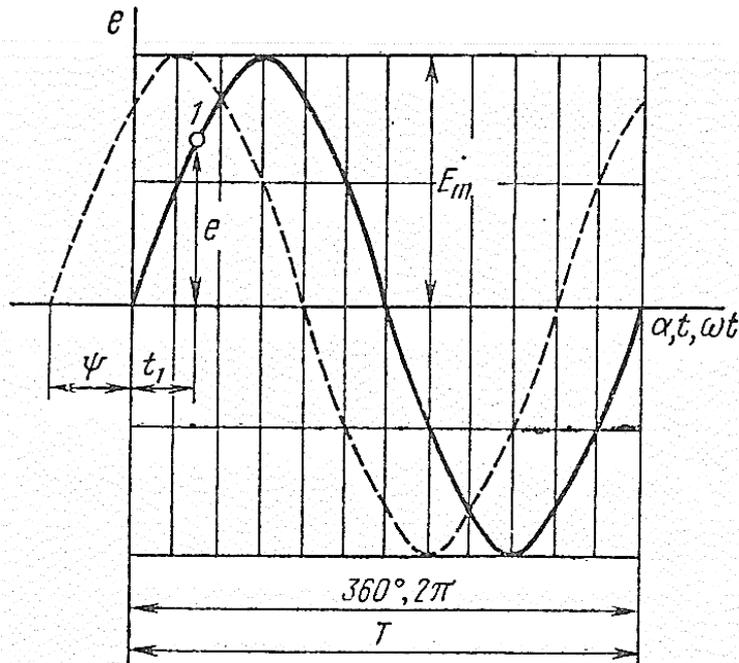


Рис. 8.7. График мгновенных значений ЭДС цепи синусоидального тока

График, выполненный основной линией, соответствует уравнению

$$e = E_m \sin \omega t, \quad (8.6)$$

где  $E_m$  – амплитуда колебаний;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота ( $f$  – собственная частота) колебаний.

Поскольку начальный момент времени  $t_0$  выбирается произвольно, то для  $t_0 \neq 0$  ЭДС равна

$$e = E_m \sin(\omega t - \psi), \quad (8.7)$$

что отражает пунктирный график на рис. 8.7.

В соответствии с уравнениями (8.6) и (8.7) информативными параметрами синусоидального сигнала служат амплитуда  $E_m$  и частота  $f$ .

При использовании последовательности прямоугольных импульсов (рис. 8.8) информативными параметрами будут длительность импульса  $t_u$ , период следования  $T$  и амплитуда  $E$ .

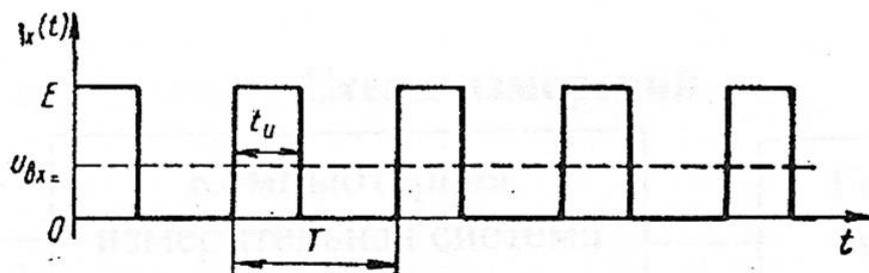


Рис. 8.8. Последовательность прямоугольных импульсов

Используют также коэффициент заполнения  $K_3 = t_u / T$  и дуальную величину *скважность*  $C = 1/K_3 = T/t_u$ .

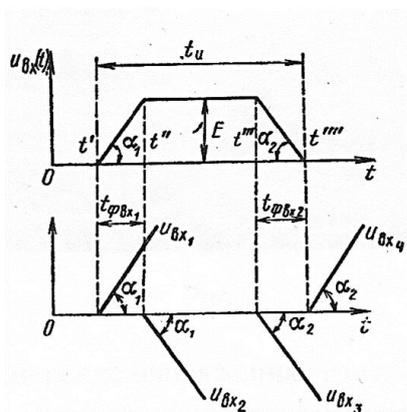


Рис. 8.9. Параметры трапецеидального импульса и принцип его образования

За счет наличия реактивностей в цепи реальный импульс имеет некоторые длительности нарастания напряжения (фронт импульса) и спада – срез (задний фронт). Часто идеализируют форму такого импульса, принимая ее за трапецию. На рис. 8.9 показан принцип получения трапецеидального импульса из линейно изменяющихся напряжений, где  $t_{фвх1}$  – длительность фронта,  $t_{фвх2}$  – длительность среза.

К информативным параметрам трапецеидального импульса относят:

$E$  – амплитуду импульса;

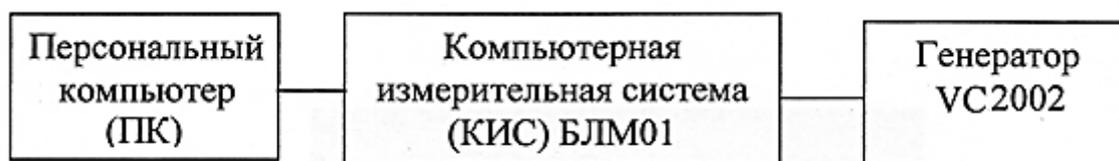
$t_{фвх1}$ ,  $t_{фвх2}$  – длительности переднего и заднего фронтов;

$t_u$  – длительность импульса;

$K = E / t_{ф}$  – крутизну фронта.

## Порядок выполнения работы

### Схема измерений



1. Соединить КИС и ПК сигнальным кабелем и подсоединить кабели питания к силовой сети.

2. Подключить выход генератора к выходу канала 1 КИС.

3. Включить ПК.

4. Запустить программу L-micro.

5. Выбрать меню «Датчики» (рис. 8.10).



Рис. 8.10. Интерфейс панели управления

6. Выбрать пункт меню «Измерение напряжения» (рис. 8.11).

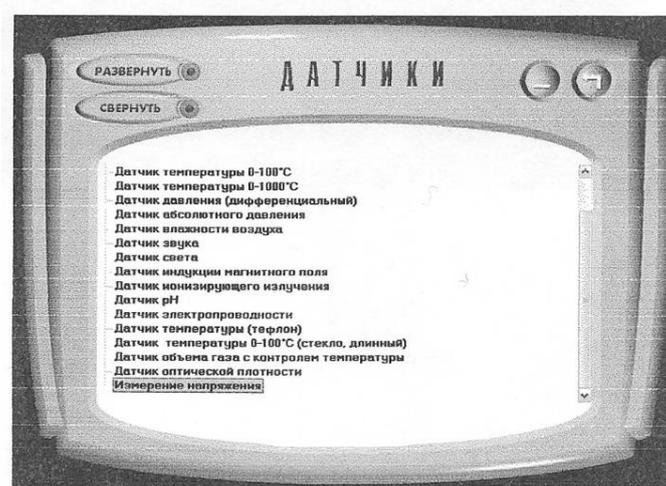


Рис. 8.11. Интерфейс панели задач

7. Выбрать пункт меню «Проведение измерения» (рис. 8.12).



Рис. 8.12. Выбор кнопки «Проведение измерений»

8. Включить генератор и установить режим сигнала (sin) кнопкой WAVE. Параметры сигнала генератора устанавливает преподаватель, например  $f = 1000$  Гц,  $U_m = 5$  В.

9. Для начала измерений нажать кнопку «ПУСК» (рис. 8.13).

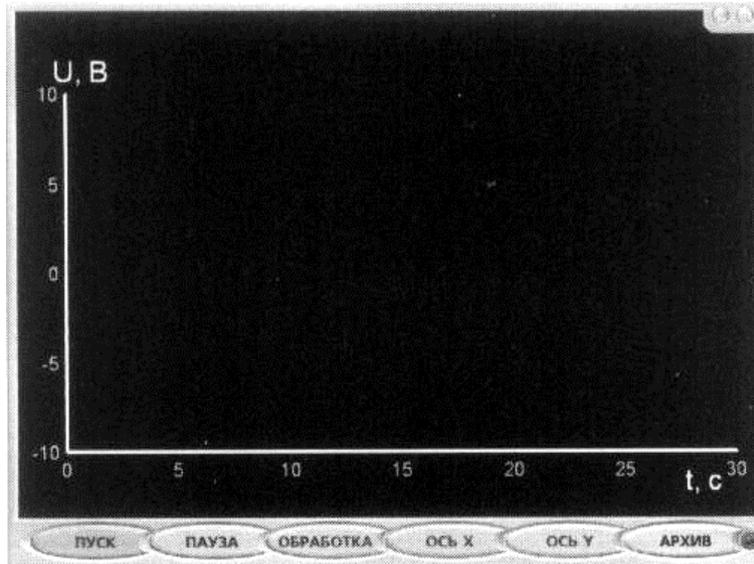


Рис. 8.13. Выбор кнопки «ПУСК»

10. Получить на экране осциллограмму вида sin и зафиксировать ее кнопкой «СТОП» (рис. 8.14).

Произвести измерения:

- амплитуды;
- периода колебаний.

Результаты измерений внести в отчет.

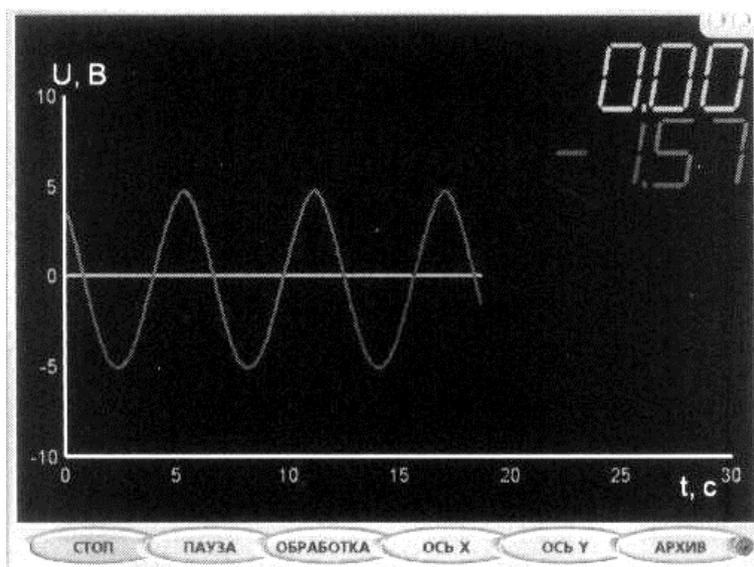


Рис. 8.14. Фиксация осциллограммы кнопкой «СТОП»

11. На генераторе кнопкой WAVE перейти в режим прямоугольного сигнала. Зафиксировать осциллограмму на экране монитора кнопкой «СТОП» (рис. 8.15).

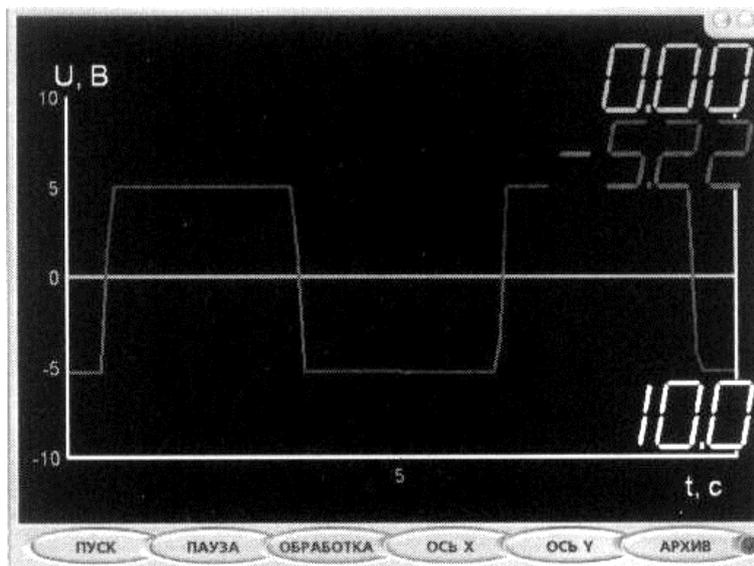


Рис. 8.15. Окно отображения осциллограммы

Произвести измерения:

- периода последовательности импульсов  $T$ ;
- амплитуды  $U_m$ ;
- длительностей импульса  $t_u$ ;
- фронта  $t_\phi$ ;
- среза  $t_{ср}$ .

Результаты измерений занести в таблицу:

Измерено					Вычислено	
$T, с$	$U_m, В$	$t_u, с$	$t_\phi, мс$	$t_{ср}, мс$	$K_3$	$C$

12. На генераторе кнопкой «WAVE» перейти в режим треугольного сигнала. Зафиксировать осциллограмму на экране монитора кнопкой «СТОП» (рис. 8.16).

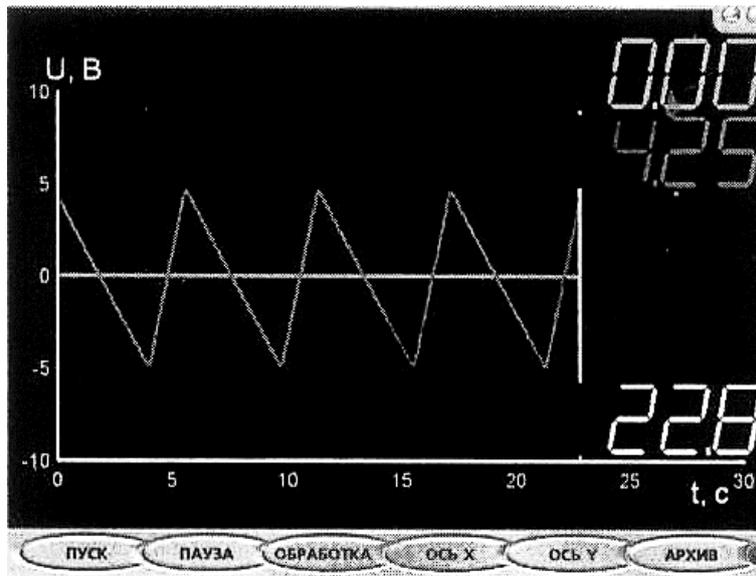


Рис. 8.16. Зафиксированная на экране осциллограмма треугольного сигнала

Произвести измерения:

- периода последовательности импульсов  $T$ ;
- амплитуды  $U_m$ ;
- длительности импульса  $t_u$ ;
- фронта  $t_u$ ;
- среза  $t_{ср}$ .

Результаты измерений оформить в виде таблицы:

Измерено					Вычислено	
$T, с$	$U_m, В$	$t_u, с$	$t_{ф}, мс$	$t_{ср}, мс$	$K_з$	$C$

13. Перейти в режим калькулятора. Произвести расчеты, данные внести в отчет.

### Форма отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений, по которой производился эксперимент.
2. Результаты измерений.
3. Эскизы осциллограмм с обозначением параметров.
4. Ответы на контрольные вопросы.

## Литература

Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

### Контрольные вопросы и задания

1. Что такое средство измерений?
2. Назовите статические характеристики и параметры средств измерений.
3. Что такое функция преобразования средства измерений? Какие виды функций преобразования используются в метрологии?
4. Назовите динамические характеристики и параметры средств измерений.
5. Что такое полоса пропускания средства измерений и как она связана с амплитудно-частотной характеристикой?
6. Каким образом классифицируются средства измерений?
7. Какие средства измерений относятся к элементарным? Какие функции они выполняют? Почему они называются элементарными?
8. Какие типы измерительных преобразователей вы знаете? Для чего предназначены аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи?
9. Из чего состоит аналоговый измерительный прибор? Как устроены применяемые в них отсчетные устройства?
10. Из каких структурных элементов состоит цифровой измерительный прибор? Чем он отличается от аналогового измерительного прибора?
11. Что такое измерительно-вычислительные комплексы? Как они устроены?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисциплина «Электрорадиоизмерения» занимает важное место в системе подготовки будущих учителей технологии. Современные средства измерений используют аналоговые и цифровые методы преобразования первичных параметров. В рамках практикума студенты изучают устройство приборов по различным схемам – структурным, функциональным, принципиальным, знакомятся с конструктивными особенностями исполнения.

На данном этапе обучения студент имеет представление о тенденции развития средств электрорадиоизмерений, особенностях их применения в научных исследованиях, испытаниях технических изделий и проектировании технологических процессов.

Предложенные лабораторные работы способствуют закреплению у студентов знаний и умений, необходимых в будущей профессиональной деятельности, закладывают основу для дальнейшего изучения дисциплин по направлениям подготовки «Технология», «Экономическое образование». Практикум нацелен на развитие аналитического мышления. Студент осваивает практические методы исследования, методы обработки полученных в эксперименте результатов и их интерпретацию. Защита лабораторных работ – это демонстрация самостоятельной деятельности студентов: студенты излагают принципы устройства и действие приборов, анализируют полученные экспериментальные результаты, формулируют выводы.

После прохождения всего курса студент готов применять основные методы измерений, обоснованно выбирать средства измерений для решения практических задач, участвовать в научных исследованиях, применяя методы электрических измерений, а также формулировать научно обоснованные выводы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афонский, А. А.* Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов ; под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М. : Пресс, 2011. – 688 с. – ISBN 978-5-94074-626-3.
2. *Бакланов, И. Г.* Методы измерений в системах связи / И. Г. Бакланов. – М. : Радио и связь : Эко-Трендз, 1999. – 204 с.
3. *Баруздин, С. А.* Основы метрологии и радиоизмерений : лаб. практикум / С. А. Баруздин, А. А. Данилин. – СПб. : ЛЭТИ, 2015. – 124 с. – ISBN 978-5-7629-1673-8.
4. ГОСТ 8.009-84. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. РД50-453-84. Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
5. *Данилин, А. А.* Измерения в радиоэлектронике : учеб. пособие / А. А. Данилин, Н. С. Лавренко. – СПб. : Лань, 2017. – 408 с. – ISBN 978-5-8114-2238-8.
6. *Они же.* Приборы и техника радиоизмерений : учеб. пособие / А. А. Данилин, Н. С. Лавренко. – СПб. : ЛЭТИ, 2013. – 204 с. – ISBN 978-5-7629-1451-2.
7. *Дворяшин, Б. В.* Основы метрологии и радиоизмерения / Б. В. Дворяшин. – М. : Радио и связь, 1992. – 320 с.
8. *Дьяконов, В. П.* Современные измерительные генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. – М. : Пресс, 2011. – 384 с. – ISBN 978-5-94074-709-3.
9. *Крылова, Г. Д.* Основы стандартизации, сертификации, метрологии : учеб. для вузов / Г. Д. Крылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 711 с. – ISBN 5-238-00106-1.
10. *Кушнир, В. Д.* Электроизмерения / В. Д. Кушнир. – М. : Радио и связь, 1985. – 368 с.
11. *Он же.* Электроизмерения / В. Д. Кушнир. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
12. *Кушнир, Ф. В.* Измерения в технике связи / Ф. В. Кушнир, В. Г. Савенко, С. М. Верник. – М. : Связь, 1976. – 432 с.
13. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / С. И. Боридько [и др.] ; под ред. Б. Н. Тихонова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 374 с. – ISBN 5-93517-338-7.

14. Метрология и измерения в телекоммуникационных системах : учеб. для вузов / Б. П. Хромой [и др.]. – М. : ИРИАС, 2008. – 21 с. – ISBN 978-5-93592-035-7.

15. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2005. – 383 с. – ISBN 5-06-004069-0.

16. Метрологическое обеспечение систем передачи : учеб. пособие для вузов / Б. П. Хромой [и др.] ; под ред. проф. Б. П. Хромого. – М. : Радио и связь, 1991. – 392 с.

17. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи : учеб. пособие для вузов / Б. П. Хромой [и др.] ; под ред. проф. Б. П. Хромого. – М. : Радио и связь, 1986. – 424 с.

18. *Мирский, Г. Я.* Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.

19. *Баруздин, С. А.* Приборы и техника радиоизмерений : лаб. практикум / С. А. Баруздин, А. А. Данилин, Д. О. Москалец ; Санкт-Петербург. гос. электротехн. ун-т им. В. И. Ульянова (Ленина). – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ, 2012. – 103 с. – ISBN 978-5-7629-1375-1.

20. *Сергеев, А. Г.* Метрология : учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М. : ЛОГОС, 2001. – 408 с. – ISBN 5-94010-039-2.

21. *Сергеев, А. Г.* Метрология, стандартизация, сертификация : учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. – М. : ЛОГОС, 2005. – 196 с. – ISBN 5-94010-374-X.

22. *Бакланов, И. Г.* Технологии измерений в первичной сети. В 2 ч. Ч. 1 / И. Г. Бакланов. – М. : Радио и связь : Эко-Трендз, 2000. – 142 с. – ISBN 5-88405-019-4.

23. О техническом регулировании : федер. закон Рос. Федерации от 27 дек. 2002 г. № 184-ФЗ [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 15.10.2016).

24. *Хамадулин, Э. Ф.* Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / Э. Ф. Хамадулин. – М. : Юрайт, 2014. – 365 с. – ISBN 978-5-9916-4276-7.

25. *Шишкин, И. Ф.* Метрология, стандартизация и управление качеством / И. Ф. Шишкин. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 342 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

### Приложение 1

#### Осциллоскоп CQ5010B

##### *Инструкция по эксплуатации*

Осциллоскоп предназначен для исследования форм электрических сигналов, измерения их параметров, выявления вольт-амперных характеристик и др.

Все элементы управления осциллоскопом выведены на переднюю и заднюю панели.

Для подготовки осциллоскопа к работе необходимо:

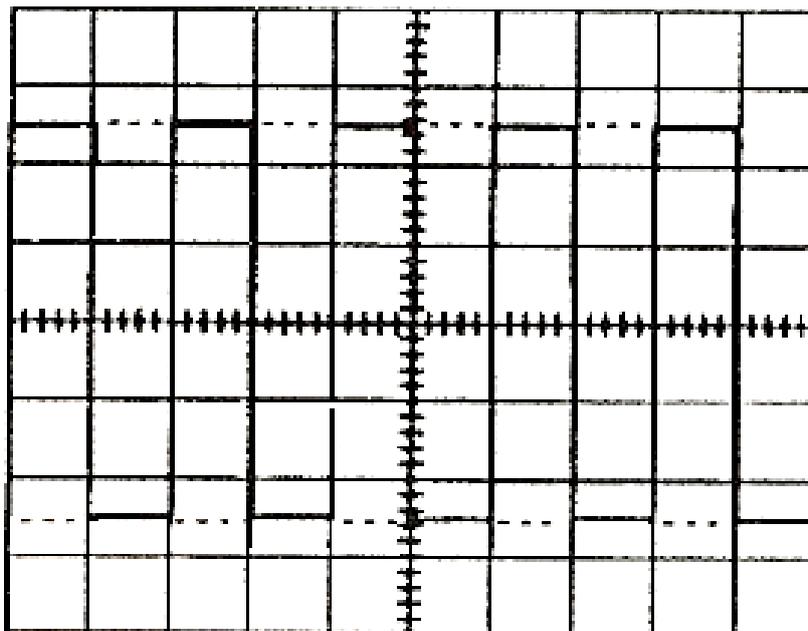
1. Подключить кабель питания прибора к сети.
2. Включить питание переключателем «POWER» (при этом должна высветиться сигнальная лампочка) и дать прогреться прибору в течение 1 – 2 мин.
3. Установить необходимую яркость свечения линии развертки ручкой «INTENSITY».
4. Установить четкое изображение линии развертки ручкой «FOCUS».
5. Установить линию развертки в центр экрана ручкой «POSITION».

*Примечание.* Нельзя допускать на экране ЭЛТ ярко светящейся неподвижной точки. Продолжительное действие интенсивного, резко сфокусированного, электронного пучка в виде неподвижной точки вызывает выгорание экрана, потому желательно использовать возможно меньшую яркость пятна, допустимую условиями работы.

6. Провести калибровку прибора. Подключить настроечный щуп ко входу  $Y$  «INPUT» и к «PROBE ADJUST».

*Для калибровки амплитуды:*

Установить переключатель «VOLTS/DIV» в положение 10 mV, вращать ручкой «POSITION» и «VOLT VAR» до получения следующего изображения.



После установки калибровки ручку «VOLT VAR» при измерении не трогать.

*Для калибровки частоты:*

Установить ручку «TIME/DIV» в положение .2 mS. При помощи ручек «POSITION» и «TIME VAR» добиться изображения, как на рисунке выше.

После установки калибровки ручки «VOLT VAR» и «TIME VAR» не трогать.

7. Исследуемый электрический сигнал подключить кабелем к входу Y «INPUT».

8. Установить удобные для наблюдения размеры изображения регулировкой переключателей «VOLTS/DIV» и «TIME/DIV».

9. Добиться устойчивого (непрерывного) изображения синусоиды ручкой «LEVEL» (синхронизация).

10. Положение эпюры напряжений исследуемого сигнала по полю экрана симметрировать ручками  $\updownarrow$  POSITION,  $\leftrightarrow$  POSITION

## *Приложение 2*

### **Генератор сигналов звуковой и ультразвуковой частоты ГЗ-33**

### *Инструкция по эксплуатации*

Генератор типа ГЗ-33 представляет собой источник синусоидальных электрических колебаний звуковых и ультразвуковых частот. Это измерительный генератор, предназначенный для регулировки и испытания низкочастотных каскадов радиоаппаратуры в лабораторных и заводских условиях.

Диапазон частот генератора ГЗ-33 от 20 до 200 000 Гц.

Генератор питается от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

Подготовка прибора к работе:

1. Вилку шнура питания включить в сеть переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 В.

2. Поставить тумблер включения сети в положение «ВКЛ.», при этом должна загореться подсветка шкалы аттенюатора.

3. Установка частоты:

– частоты первого поддиапазона 20 – 200 Гц устанавливаются поворотом шкалы, при этом переключатель «МНОЖИТЕЛЬ» находится в положении «ХI». Частота в герцах соответствует отсчету шкалы.

– частоты второго поддиапазона 200 – 2000 Гц устанавливаются поворотом шкалы, при этом переключатель «МНОЖИТЕЛЬ» находится в положении «Х10» и отсчет шкалы умножается на 10.

– частоты третьего поддиапазона 2000 – 20 000 Гц устанавливаются поворотом шкалы, при этом переключатель «МНОЖИТЕЛЬ» находится в положении «ХI00» и отсчет шкалы умножается на 100.

– частоты четвертого поддиапазона 20 000 – 200 000 Гц устанавливаются поворотом шкалы, при этом переключатель «МНОЖИТЕЛЬ» находится в положении «ХI000» и отсчет шкалы умножается на 1000.

4. Регулировка и отчет выходного напряжения:

– величину выходного напряжения генератора можно изменить плавно ручкой «РЕГ. ВЫХОДА» и ступенями через каждые 10 дБ при помощи переключателя аттенюатора, имеющего гравировку «ПРЕДЕЛЫ ШКАЛЫ» – «ОСЛАБЛЕНИЕ ДБ».

– переключение предела шкалы в зависимости от выходного сопротивления производится переключателем «ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ Q».

– при работе на сопротивление нагрузки значительно большие, чем 6000 Ом, для правильного отсчета выходного напряжения следует включить внутреннюю нагрузку тумблером «ВНУТР. НАГР.».

### *Приложение 3*

#### **Значения распределения Стьюдента**

<i>n</i>	Доверительная вероятность <i>P</i>				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,68	636,62
3	2,92	4,30	6,97	9,93	31,60
4	2,35	2,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,06	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
∞	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

### *Приложение 4*

#### **Значения критерия Диксона**

$n$	$Z_q$ при $q$ равном			
	0,10	0,05	0,02	0,01
4	0,68	0,76	0,85	0,89
6	0,48	0,56	0,64	0,70
8	0,40	0,47	0,54	0,59
10	0,35	0,41	0,48	0,53
14	0,29	0,35	0,41	0,45
16	0,28	0,33	0,39	0,43
18	0,26	0,31	0,37	0,41
20	0,26	0,30	0,36	0,39
30	0,22	0,26	0,31	0,34

*Приложение 5*

**Значения  $\chi_q^2$  при различном уровне значимости**

V	Значения $\chi_q^2$ при уровне значимости $q$ , равном								
	0,99	0,95	0,9	0,8	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02
2	0,02	0,1	0,21	0,45	1,39	3,32	4,61	5,99	7,82
4	0,3	0,71	1,06	1,65	3,36	5,99	7,78	9,49	11,67
6	0,87	1,63	2,20	3,07	5,35	8,56	10,65	12,59	15,03
8	1,67	2,73	3,49	4,59	7,34	11,03	13,36	15,51	18,17
10	2,56	3,94	4,87	6,18	9,34	13,44	15,99	18,31	21,16
12	3,57	5,23	6,30	7,81	11,34	15,81	18,55	21,03	24,05
14	4,66	6,57	7,79	9,47	13,34	18,15	21,06	23,69	26,87
16	5,81	7,96	9,31	11,2	15,34	20,46	23,54	26,3	29,63
20	8,26	10,85	12,44	14,58	19,34	25,04	28,41	31,41	35,02
25	11,52	14,61	16,47	18,94	24,34	30,68	34,38	37,65	41,57
30	14,95	18,46	20,60	23,36	29,34	36,25	40,26	43,77	47,96

*Приложение 6*

**ЧАСТОТОМЕР ЭЛЕКТРОННО-СЧЕТНЫЙ ВС3165**

*Инструкция по эксплуатации*

**1. ТРЕБОВАНИЯ**

- а) питание: 220 В ± 10 %, потребляемая мощность – не более 5 Вт;
- б) перед измерениями дайте прибору прогреться в течение 10 мин.

При этом схема и кварцевый генератор выходят на рабочий режим, обеспечивая точность и стабильность измерений.

## **2. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ**

Прежде всего подключите шнур питания и включите кнопку питания прибора. Дайте частотомеру прогреться в течение 10 мин.

### **Измерение частоты**

а) выберите входной разъем частотомера (вход СН А или СН В в зависимости от диапазона измерения) и подключите его через кабель к источнику сигнала;

б) если измеряемый сигнал меньше 100 Гц, нажмите кнопку АС/DC;

в) если амплитуда входного сигнала велика, нажмите кнопку аттенюатора для включения режима ослабления входного сигнала;

г) при нажатии кнопки FUNCTION младший разряд дисплея показывает порядковый номер шага (например, на рис. Пб.1, шаг 2):

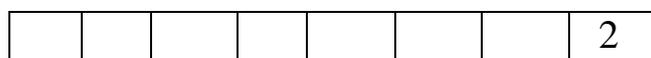


Рис. Пб.1

Измерение частоты имеет только три шага, смена шагов идет по кругу, рис. Пб.2.

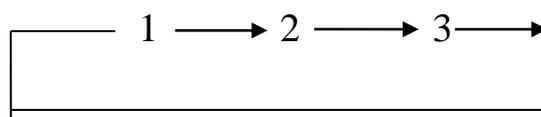


Рис. Пб.2

д) после выбора шага режима измерения нажмите кнопку CONFIRM (Подтверждение), инструмент начнет измерения, и его результаты будут отображаться на дисплее;

е) время счета можно плавно регулировать с помощью ручки GATE TIME в оптимальный режим измерения.

### **Счет импульсов**

а) подключить источник сигнала к частотомеру при помощи кабеля;

- б) с помощью ручки GATE TIME установить интервал счета;
- в) кнопкой FUNCTION установить прибор на 3-й шаг;
- г) нажать кнопку CONFIRM: прибор начнет счет, и на дисплее будет отображаться число приходящих импульсов, светодиод COUNT станет при этом мерцать.

### ***Измерение периода повторения импульсов***

В режиме измерения частоты нажмите кнопку PERIOD: прибор начнет измерение периода колебаний, и на дисплее отобразятся результат измерений, режим измерения и измеряемая величина.

### ***Пояснения***

а) переключатель FUNCTION, 3 шага:

- 50 МГц – 2,4 ГГц, используется вход СН В, единицы измерения – МГц/мсек.
- 2 МГц – 50 МГц, используется вход СН А, единицы измерения – МГц/мсек.
- 0,01 Гц – 2 МГц, используется вход СН А, единицы измерения КГц/сек.

На этих шагах измеряется частота и мигает светодиод FREQ.

- Суммирование импульсов на входе СН А, мигает светодиод COUNT.

б) Для измерения периода повторения колебаний нажмите кнопку PERIOD;

в) кнопка CONFIRM: при нажатии этой кнопки происходит подтверждение выбранного режима и запуск частотомера в этом режиме.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРАКТИКУМА.....	5
Лабораторная работа № 1. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ.....	6
Лабораторная работа № 2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ.....	20
Лабораторная работа № 3. ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.....	41
Лабораторная работа № 4. ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ .....	53
Лабораторная работа № 5. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	70
Лабораторная работа № 6. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТОРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	84
Лабораторная работа № 7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ .	102
Лабораторная работа № 8. КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	140
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	141
ПРИЛОЖЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ .....	143

*Учебное издание*

ОРЛОВ Юрий Борисович

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ  
«ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ»

Редактор Е. С. Глазкова

Технический редактор А. В. Родина

Корректор Н. В. Пустовойтова

Компьютерная верстка Л. В. Макаровой

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 27.12.18.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 8,84. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.